



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

RONALDO MENEZES DOS SANTOS JUNIOR

**PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE  
POEIRA EM MANUSEIO DE MINÉRIO**

Tucuruí, Pará.

2021

RONALDO MENEZES DOS SANTOS JUNIOR

**PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE  
POEIRA EM MANUSEIO DE MINÉRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de pós-graduação em Engenharia de Infraestrutura e de Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos 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, Pará.

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)**

---

D722p dos Santos Jr, Ronaldo Menezes.  
Procedimentos experimentais para avaliação da emissão de poeira em manuseio de minério / Ronaldo Menezes dos Santos Jr. — 2017.  
xix, 201 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2017.

1. Emissão de poeira. 2. Supressores de poeira. 3. Torre de poeira. 4. Túnel de vento. 5. Minério de ferro. I. Título.

CDD 622

---

RONALDO MENEZES DOS SANTOS JUNIOR

**PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE  
POEIRA EM MANUSEIO DE MINÉRIO**

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.

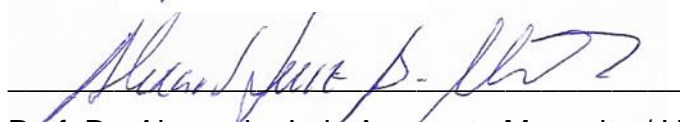
Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita

Aprovada em 29 de novembro de 2018.

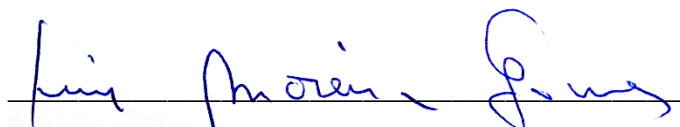
BANCA EXAMINADORA:



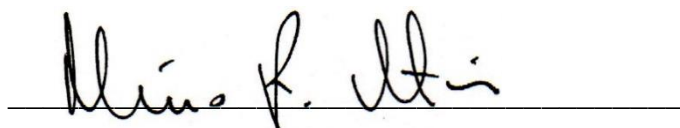
Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita / Universidade Federal do Pará – Orientador



Prof. Dr. Alexandre Luiz Amarante Mesquita / Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Luiz Moreira Gomes / Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará



Prof. Dr. Marcio Ferreira Martins / Universidade Federal do Espírito Santo



Dr. Carlos de Figueiredo Gontijo / Instituto Tecnológico Vale

*Dedico este trabalho aos meus  
pais, Selma e Ronaldo,  
pelo amor e incentivo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, à minha família, meus pais Selma e Ronaldo e minha irmã Sandy pelo incentivo que sempre me proporcionaram durante todas as etapas de minha vida pessoal e profissional.

Ao professor André Luiz Amarante Mesquita, pela orientação, apoio e amizade durante toda essa caminhada.

Aos alunos Artur Cunha, Arthur Fontana, Rodolfo Ramalho e Vitor César pela ajuda e compromisso que tiveram durante toda a etapa experimental desse trabalho. A dedicação desses alunos foi primordial para o desenvolvimento desse trabalho.

Gostaria de agradecer à minha namorada Danyella Cardoso pelo amor e companheirismo durante esse período de mestrado.

Agradeço ao Dr. Carlos Gontijo pelo apoio e orientação durante o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço ao Instituto de Tecnologia da Vale pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro durante o mestrado.

Por fim, agradeço a todos os amigos e colegas que tive o prazer de conhecer em Tucuruí, pelo carinho e respeito com que sempre me trataram.

## RESUMO

### PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE POEIRA EM MANUSEIO DE MINÉRIO

A geração de poeira durante o manuseio e transporte de granéis acarreta uma série de problemas, tais como a poluição do ar e perda de material valioso. Em função do risco associado à inalação de poeira, diversos mecanismos de controle têm sido adotados. A utilização de água é uma opção viável para se inibir a geração de poeira, embora a utilização de supressores químicos, em alguns casos seja mais adequado. No entanto, normas e métodos para caracterização da geração de particulados, para a escolha adequada do mecanismo de controle, não são muito consolidados na literatura. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é desenvolver metodologias de ensaios para avaliar a emissão de particulados de minérios. A emissão de particulado durante o transporte foi avaliada em uma bancada de ensaios desenvolvida através da adaptação de um túnel de vento existente, por meio de ensaios com modelo de vagão, nas velocidades do ar de 40 km/h e 70 km/h, para diferentes valores de umidade do minério de ferro. Resultados mostram que o aumento da velocidade do escoamento aumenta a perda de massa de material contida no interior do modelo de vagão e o aumento da umidade do material reduz significativamente a perda de massa, sendo potencializado com o uso de supressores de poeira aplicado na superfície do material. Para simular o manuseio do material, desenvolveu-se uma bancada que utiliza o conceito da técnica de torre de poeira, a qual possibilita ensaios de geração da poeira durante a descarga de material. Nos resultados obtidos verifica-se também que o aumento de umidade do material reduz significativamente a emissão de particulados, sendo mais evidente para os materiais que possuem maior percentual de finos. A influência de supressores também foi avaliada, e dentre os reagentes testados, o  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  apresentou o melhor resultado para o *pellet feed* moído, reduzindo bastante a emissão de particulados em relação ao uso somente de água. Para as pelotas, o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  apresentou os melhores resultados para a condição sem tempo de cura e o  $\text{CaCl}_2$  para a condição com tempo de cura de 2 horas. Portanto, os resultados mostram que as bancadas e procedimentos experimentais desenvolvidos, apresentaram resultados satisfatório e coerentes, os quais são confiáveis para a caracterização da emissão de particulados de diversos materiais.

**Palavras-chave:** Emissão de poeira. Supressores de poeira. Torre de poeira. Túnel de vento. Minério de ferro.

## ABSTRACT

### EXPERIMENTAL TECHNIQUES FOR THE CHARACTERIZATION OF DUST EMISSION FROM MINERAL PRODUCTS

The generation of dust during the handling and transportation of bulk causes a series of problems, such as the erected air and loss of valuable material. Due to the risk associated with inhalation of dust, several control mechanisms have been adopted. The use of water is a viable option to inhibit the generation of dust, although the use of chemical suppressants is in some cases more appropriate. However, standards and methods for characterizing the generation of particulates are not very consolidated in the literature, for the proper selection of the control mechanism. Therefore, this study aimed to develop test methodologies to evaluate the emission of minerals particulate. The emission of particulate during transport was evaluated in a test bench developed by adapting an existing wind tunnel, using a wagon model and air speeds of 40 km/h and 70 km/h, for different iron ore moisture values. Results show that the increase in flow speed increases the loss of material mass contained inside the wagon model and the increase in material moisture significantly reduces the loss of mass, being enhanced with the use of dust suppressants applied to the material surface. To simulate material handling, a bench was developed using the dust tower technique concept, which allows dust generation tests during material discharge. In the results obtained, it is also verified that the increase in material moisture significantly reduces the emission of particulates, being more evident for materials that have a higher percentage of fines. The influence of suppressants was also evaluated, and among the tested reagents  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  showed the best result for the *pellet feed* milled, greatly reducing the emission of particulates in relation to the use of water only. For pellets,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  showed the best results without curing time and  $\text{CaCl}_2$  for the condition with curing time of 2 hours. Therefore, the results show that the benches and experimental procedures developed, presented satisfactory and coherent results, which are reliable for the characterization of the emission of particulates from different materials.

**Keywords:** Dust emission. Dust suppressants. Dust tower. Wind tunnel. Iron ore.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 – Graneis sólidos movimentados pelos portos do Brasil em 2017.....   | 25 |
| Figura 2.2 – Produção de minérios de ferro em Vargem Grande/MG.....   | 27 |
| Figura 2.3 – Cadeia integrada de valor global da Vale.....  | 29 |
| Figura 2.4 – Processo de produção do aço na indústria siderúrgica.....  | 30 |
| Figura 2.5 – Fluxograma resumido da produção de carvão em Moatize.....  | 31 |
| Figura 2.6 – A cadeia de suprimento do minério de ferro no Sistema Sudeste.....   | 32 |
| Figura 2.7 – Carregamento de Vagões.....  | 33 |
| Figura 2.8 – Virador de vagões.....   | 33 |
| Figura 2.9 – Transportador de correia.....  | 34 |
| Figura 2.10 – Empilhadeira.....   | 34 |
| Figura 2.11 – Recuperadora.....   | 35 |
| Figura 2.12 – Carregamento de navios.....   | 35 |
| Figura 2.13 – Pátio de armazenamento de minério.....  | 36 |
| Figura 2.14 – Transporte ferroviário de minério de ferro.....   | 37 |
| Figura 2.15 – Linha ferroviária da (a) EFC e (b) EFVM.....  | 38 |
| Figura 2.16 – Emissão de poeira em operações com minérios.....  | 39 |
| Figura 2.17 – Deposição de material particulado no tecido pulmonar humano.....  | 40 |
| Figura 2.18 – Regulamentação em vigor no Brasil para material particulado.....  | 43 |
| Figura 2.19 – O pó preto da Grande Vitória.....   | 43 |
| Figura 2.20 – Comportamento da temperatura e umidade relativa do ar no interior de um secador ao longo de tempo .....                             | 45 |
| Figura 2.21 – Mecanismos de movimento de partículas devido à ação do vento. ....  | 46 |
| Figura 2.22 – (a) Secagem sob condições constantes do meio de seca; (b) Redução da umidade do sólido em função do tempo .....                     | 47 |
| Figura 2.23 – Esfericidade de partículas de forma regular .....   | 48 |
| Figura 2.24 – Velocidade de captura em função da esfericidade de partículas de areia.....   | 48 |
| Figura 2.25 – Relações de tamanhos de partículas.....   | 49 |
| Figura 2.26 – Forças de adesão em função do diâmetro da partícula.....  | 51 |
| Figura 2.27 – a) Tensão de superfície na interface ar-líquido em um tubo capilar; b) Diferença de pressão na interface ar-líquido do menisco..... | 52 |
| Figura 2.28 – Superfícies de interface e ângulo de contato.....   | 52 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.29 – Ponte de líquido e os raios de curvatura de um menisco .....   | 53 |
| Figura 2.30 – (a) Influência da geometria da partícula na força capilar; (b) Efeito da umidade relativa do ar na força capilar .....                       | 54 |
| Figura 2.31 – a) Comportamento da massa específica aparente de partículas em função de sua umidade; b) Resultado obtido para o minério de ferro PXBR ..... | 57 |
| Figura 2.32 – Esquema de forças atuantes em um leito de partículas .....   | 58 |
| Figura 2.33 – a) Filtro de mangas; b) Precipitador eletrostático .....   | 59 |
| Figura 2.34 – a) Enclausuramento das casas de transferências e b) Wind fences...   | 60 |
| Figura 2.35 – Enclausuramento de transportador de correia.....   | 60 |
| Figura 2.36 – Influência tamanho de gotículas de água na supressão de poeira .....   | 61 |
| Figura 2.37 – Sistemas de aspersão de água.....  | 62 |
| Figura 2.38 – Aplicação de supressor químico em: a) vagões e b) pilhas de estocagem.. .....  | 63 |
| Figura 2.39 – Capacidade uma gota na coleta de partículas de carvão com (a) alta tensão interfacial e com (b) baixa tensão interfacial.....                | 63 |
| Figura 2.40 – A formação de superfície hidrofílica em partículas de carvão.....  | 65 |
| Figura 2.41 – Métodos de avaliação de supressores .....  | 66 |
| Figura 2.42 – (a) Aparato de testes da norma Australiana AS4156.6; (b) desenho esquemático do tambor de ensaio .....                                       | 67 |
| Figura 2.43 – Curva de poeira/umidade, mostrando o DEM = 8,8%.....   | 67 |
| Figura 2.44 – Teste de poeira no minério em 8.1% de umidade (DEM = 11%) .....  | 68 |
| Figura 2.45 – a) Aparato de testes da norma europeia EN15051 e b) desenho esquemático do tambor de ensaio .....  | 69 |
| Figura 2.46 – a) Filtros e b) interior do tambor da EN 15051, após um teste completo com de minério de ouro a 0% de umidade .....                          | 69 |
| Figura 2.47 – Comparação entre os testes AS4156.6 e EN15051 .....  | 70 |
| Figura 2.48 – Dimensões em escala real dos vagões modelados (dimensões em mm).....   | 72 |
| Figura 2.49 – Modelo da composição ferroviária máxima e b) detalhe do vagão... ..  | 72 |
| Figura 2.50 – Túnel de vento utilizado .....   | 73 |
| Figura 2.51 – Modelo de vagão, em escala 1:25, carregado de minério de ferro .....   | 73 |
| Figura 2.52 – Perda de massa para o concentrado de Brucutu.....  | 74 |
| Figura 2.53 – Túnel de vento para estudo da desumidificação de sólidos.....  | 75 |
| Figura 2.54 – Vista do acondicionamento de sólidos na bandeja de secagem .....   | 75 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 2.55 – Curva de paridade do modelo de predição de redução de umidade...                            | 76  |
| Figura 2.56 – Conceitos de torre de poeira: a) ARC e b) IFDC .....  | 77  |
| Figura 2.57 – Projeto conceitual da torre de poeira com inclinações do IFDC.....                          | 78  |
| Figura 2.58 – Torre de poeira desenvolvida Copeland e Kawatra .....                                       | 79  |
| Figura 2.59 – Influência do CaCl <sub>2</sub> na supressão de MP <sub>10</sub> .....                      | 80  |
| Figura 2.60 – Ângulo de contato através da (a) gota séssil e (b) bolha aprisionada..                      | 81  |
| Figura 2.61 – a) Teste de imersão de partículas e b) o mecanismo de sedimentação das partículas.....      | 82  |
| Figura 2.62 – Teste de penetração de gota em leito de partículas .....                                    | 82  |
| Figura 2.64 – Efeito da molhabilidade na supressão de MP <sub>10</sub> de minério de ferro ..             | 85  |
| Figura 2.65 – Diferença de potencial de uma partícula em um meio de dispersão...                          | 87  |
| Figura 2.66 – Ponto isoelétrico da alumina em solução de sílica .....                                     | 88  |
| Figura 2.67 – Sedimentação de alumina em função da concentração de sílica.....                            | 88  |
| Figura 3.1 – Bancada de ensaios de arrasto eólico em túnel de vento.....                                  | 89  |
| Figura 3.2 – Perfil de velocidade do ar na seção de teste do túnel .....                                  | 90  |
| Figura 3.3 – Ilustração de um vagão utilizado na EFVM (dimensões em mm) .....                             | 90  |
| Figura 3.4 – Modelo de vagão construído em escala 1:20 (dimensões em mm) .....                            | 91  |
| Figura 3.5 – a) Sistema de medição do vagão; b) detalhe do suporte do vagão .....                         | 92  |
| Figura 3.6 – Sistema para calibração da célula de carga .....   | 92  |
| Figura 3.7 – Curva de calibração da célula de carga .....   | 93  |
| Figura 3.8 – Disposição do modelo na seção de teste (dimensões em mm) .....                               | 90  |
| Figura 3.9 – Instrumentos de medição instalados na seção de teste do túnel de vento.....                  | 94  |
| Figura 3.10 – Bancada de ensaios de arrasto eólico em túnel de vento.....                                 | 95  |
| Figura 3.11 – Misturador automatizado.....  | 96  |
| Figura 3.12 – a) Estratificação de material; b) Preenchimento do modelo de vagão.                         | 96  |
| Figura 3.13 – Formação da altura e ângulo da pila de material.....  | 97  |
| Figura 3.14 – a) Procedimento de preparo da solução aquosa; b) Aplicação da solução.....                  | 97  |
| Figura 3.15 – Cura do reagente aplicado na superfície do material.....                                    | 98  |
| Figura 3.16 – Metodologia estratificada de coleta de amostras de material para avaliação de umidade ..... | 99  |
| Figura 3.17 – Torre de poeira do Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados (UFPA).....                 | 101 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 3.18 – a) Detalhe do canal interno da torre de poeira; b) Módulos da torre de poeira montados (4 partes) .....  | 102 |
| Figura 3.19 – a) Entrada superior da torre de poeira, para alimentação da amostra de ensaio; b) Entrada da tubulação lateral de sucção.....                        | 102 |
| Figura 3.20 – a) Mecanismo de coleta de partículas; b) contador de partículas instalado na tubulação lateral da torre de poeira .....                              | 103 |
| Figura 3.21 – Desenho esquemático da bancada de ensaios – Torre de poeira ....   | 104 |
| Figura 4.1 – Peneira vibratória .....  | 109 |
| Figura 4.2 – Equipamento de difração a laser .....   | 110 |
| Figura 4.3 – Sistema de dispersão a laser.....   | 110 |
| Figura 4.4 – Aparato experimental para determinação da permeabilidade de leito de partículas .....   | 112 |
| Figura 4.5 – Aparato de análise de imagem dinâmica – CAMSIZER.....   | 113 |
| Figura 4.6 – Princípio de medição pelo CAMSIZER.....   | 114 |
| Figura 4.7 – Parâmetros de avaliação da esfericidade via CAMSIZER .....  | 114 |
| Figura 4.8 – Recipiente utilizado para medição da massa específica aparente.....   | 117 |
| Figura 5.1 – Distribuição de tamanho de partículas passante acumulado de minério de ferro e carvão.....  | 120 |
| Figura 5.2 – Distribuição de tamanho de partículas ultra-finas.....  | 121 |
| Figura 5.3 – Massa específica aparente em função da umidade – <i>Pellet feed</i> .....   | 124 |
| Figura 5.4 – Massa específica aparente em função da umidade – carvão .....   | 125 |
| Figura 5.5 – Perda de massa total à velocidade de 40 km/h – <i>Pellet feed</i> natural..   | 126 |
| Figura 5.6 – Perda de massa total à velocidade de 70 km/h – <i>Pellet feed</i> natural..   | 127 |
| Figura 5.7 – Perda de massa total à velocidade de 40 km/h – <i>Pellet feed</i> moído e prensado.....   | 128 |
| Figura 5.8 – Perda de massa total à velocidade de 70 km/h – <i>Pellet feed</i> moído e prensado.....   | 128 |
| Figura 5.9 – Umidade final do PFN em modelos de vagão.....   | 129 |
| Figura 5.10 – Perda de massas do PFN em função da velocidade do ar .....   | 130 |
| Figura 5.11 – Umidade final média estratificada do <i>Pellet feed</i> natural .....  | 133 |
| Figura 5.12 – Desempenho dos supressores químicos de cobertura .....   | 134 |
| Figura 5.13 – Perda de massa total ( $P$ ) e umidade relativa do ar ( $UR$ ) dos ensaios de arrasto eólico com a aplicação de produtos químicos de cobertura ..... | 135 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.14 – Influência da vazão de ar na torre de poeira para partículas de 5 $\mu\text{m}$ .....   | 137 |
| Figura 5.15 – Influência da vazão de ar na torre de poeira para partículas de 10 $\mu\text{m}$ .....  | 137 |
| Figura 5.16 – Influência do aumento de umidade na emissão de particulados de <i>pellet feed</i> natural de 5 $\mu\text{m}$ de diâmetro .....  | 138 |
| Figura 5.17 – Influência do aumento de umidade na emissão de particulados de <i>pellet feed</i> natural de 10 $\mu\text{m}$ de diâmetro.....  | 138 |
| Figura 5.18 – Influência do aumento de umidade na emissão de particulados de <i>pellet feed</i> moído de 5 $\mu\text{m}$ de diâmetro .....  | 139 |
| Figura 5.19 – Influência do aumento de umidade na emissão de particulados de <i>pellet feed</i> moído de 10 $\mu\text{m}$ de diâmetro .....   | 140 |
| Figura 5.20 – Influência do aumento de umidade na emissão de particulados de carvão coqueificável de 5 $\mu\text{m}$ de diâmetro.....   | 140 |
| Figura 5.21 – Influência do aumento de umidade na emissão de particulados de carvão coqueificável de 10 $\mu\text{m}$ de diâmetro.....  | 141 |
| Figura 5.22 – Influência do aumento de umidade na emissão de particulados de Carvão Térmico de 5 $\mu\text{m}$ de diâmetro .....  | 142 |
| Figura 5.23 – Influência do aumento de umidade na emissão de particulados de Carvão Térmico de 10 $\mu\text{m}$ de diâmetro .....   | 142 |
| Figura 5.24 – Densidade de carga elétrica com variação da concentração da solução, em <i>pellet feed</i> moído.....   | 144 |
| Figura 5.25 – Influência do uso de reagentes na emissão de particulados de <i>Pellet feed</i> Moído de 5 $\mu\text{m}$ de diâmetro .....  | 145 |
| Figura 5.26 – Influência do uso de reagentes na emissão de particulados de <i>Pellet feed</i> Moído de 10 $\mu\text{m}$ de diâmetro .....   | 146 |
| Figura 5.27 – Influência da densidade de carga na emissão de particulados com diâmetros de 5 $\mu\text{m}$ e 10 $\mu\text{m}$ pelo <i>Pellet feed</i> Moído, PFM, com 6 % de umidade... | 147 |
| Figura 5.28 – Densidade de carga elétrica com variação do volume da solução, em pelotas .....   | 148 |
| Figura 5.29 – Influência do uso de reagentes na supressão de particulados de pelotas de 10 $\mu\text{m}$ de diâmetro .....  | 149 |
| Figura 5.30 – Influência do tempo de cura dos reagentes na supressão de particulados de pelotas de 10 $\mu\text{m}$ de diâmetro .....   | 149 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.31 – Influência da densidade de carga na supressão de particulados de pelotas com diâmetros 10 $\mu\text{m}$ .....                                     | 150 |
| Figura 5.32 – Influência do uso de reagentes na supressão de particulados de 10 $\mu\text{m}$ de diâmetro de pelotas com adição de 1% de finos.....             | 151 |
| Figura 5.33 – Influência do tempo de cura dos reagentes na supressão de particulados de 10 $\mu\text{m}$ de diâmetro de pelotas com adição de 1 % de finos..... | 152 |
| Figura 5.34 – Influência da densidade de carga na supressão de particulados de 10 $\mu\text{m}$ de diâmetro de pelotas com adição de 1% de finos .....          | 153 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 2.1 – Produção de minério de ferro no Brasil.....                     | 27  |
| Tabela 2.2 – Evolução dos padrões de qualidade do ar definidos pela EPA..... | 42  |
| Tabela 2.3 – Meio granular sob diferentes quantidades de líquido.....        | 56  |
| Tabela 2.4 – Comparação entre os testes em tambores rotativos.....           | 70  |
| Tabela 3.1 – Incertezas sistemáticas avaliadas nos testes em bancadas.....   | 106 |
| Tabela 4.1 – Massa mínima, por amostra de ensaio, para peneiramento.....     | 108 |
| Tabela 4.2 – Incertezas sistemáticas na caracterização das amostras.....     | 118 |
| Tabela 5.1 – Esfericidades via CAMSIZER e permeametria das amostras.....     | 122 |

## LISTA DE SIGLAS

AF – Alto-forno

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários

ARC – Alberta Research Council

CCM – Carvão Coqueificável

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CTF – Centro de Tecnologia de Ferrosos Vale

CTM – Carvão Térmico

DEM – Dust Extinction Moisture

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

EFC – Estrada de Ferro Carajás

EFVM – Estrada de Ferro Vitória-Minas

EPA – Environmental Protection Agency

EPUSP – Escola Politécnica de São Paulo

IFDC – International Fertilizer Development Center

ITV – Instituto Tecnológico Vale

LALLS – Low Angle Laser Light Scattering

LCT – Laboratório de Caracterização Tecnológica

LFQI – Laboratório de Fenômenos de Transporte e Físico-química de Interfaces

MP – Material particulado

MTU – Michigan Technological University

PFM – *Pellet feed* moído e prensado

PFN – *Pellet feed* natural

PIB – Produto interno bruto

PRONAR – Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar

PTS – Partículas Totais em Suspensão

TML – Transportable Moisture Limit

UFPA – Universidade Federal do Pará

USP – Universidade de São Paulo



## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\bar{D}_s$  – Diâmetro de Sauter médio das partículas minerais
- $F_c$  – Força capilar
- $F_H$  – Forças de adesão
- $M_a$  – Massa de água;
- MP<sub>2,5</sub> – Material particulado fino com diâmetro inferior a 2,5  $\mu\text{m}$
- MP<sub>10</sub> – Material particulado com diâmetro inferior a 10  $\mu\text{m}$
- $M_s$  – Massa de sólidos
- $M_u$  – Massa de material úmido
- $P$  – Perda de massa total
- $P_a$  – Pressão ambiente
- $P_l$  – Pressão do líquido
- $R$  – Raio de uma partícula esférica
- $S_e$  – Área superficial de uma esfera de volume equivalente ao da partícula
- $S_s$  – Área superficial da partícula
- $T$  – Temperatura do ar
- $U$  – Umidade do material
- $U_p$  – Velocidade de captura
- $UR$  – Umidade relativa do ar
- $V$  – Velocidade do ar
- $\gamma$  – Tensão superficial
- $\gamma_{lv}$  – Tensão superficial na interface líquido/vapor
- $\gamma_{sl}$  – Tensão superficial na interface sólido/líquido
- $\gamma_{sv}$  – Tensão superficial na interface sólido/vapor
- $\Delta P$  – Queda de pressão
- $\varepsilon$  – Porosidade do leito de partículas
- $\theta$  – Ângulo de contato
- $\kappa$  – Permeabilidade do leito de partículas
- $\mu$  – Viscosidade dinâmica do ar
- $\rho_a$  – Massa específica aparente
- $\rho_s$  – Massa específica das partículas sólidas
- $\Psi$  – Esfericidade

# SUMÁRIO

|  |            |
|--|------------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>20</b>  |
| <b>1.1. Justificativa</b> .....  | <b>22</b>  |
| <b>1.2. Objetivos</b> .....  | <b>23</b>  |
| 1.2.1. Objetivo Geral.....   | 23         |
| 1.2.2. Objetivos específicos.....  | 23         |
| <b>1.3. Estrutura do trabalho</b> .....                                    | <b>23</b>  |
| <b>2. FUNDAMENTOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                        | <b>25</b>  |
| <b>2.1. A Cadeia de Suprimento do Minério de Ferro e Carvão</b> .....      | <b>25</b>  |
| <b>2.2. Influência da Emissão de Particulados na Qualidade do Ar</b> ..... | <b>38</b>  |
| <b>2.3. Parâmetros Associados à Geração de Poeira</b> .....                | <b>44</b>  |
| 2.3.1. Temperatura e Umidade Relativa do Ar.....                           | 44         |
| 2.3.2. Velocidade do Ar .....  | 45         |
| 2.3.3. Forma da partícula .....  | 47         |
| 2.3.4. Tamanho da partícula.....   | 49         |
| 2.3.5. Tensão Superficial.....   | 51         |
| 2.3.6. Umidade do Material.....  | 55         |
| <b>2.4. Mecanismos de Controle de Emissão de Poeira</b> .....              | <b>58</b>  |
| <b>2.5. Técnicas de Avaliação de Emissão e Supressão de Poeira</b> .....   | <b>65</b>  |
| 2.5.1. Tambor Rotativo .....   | 66         |
| 2.5.2. Túnel de Vento .....  | 71         |
| 2.5.3. Torre de Poeira.....  | 76         |
| 2.5.4. Molhabilidade .....   | 80         |
| 2.5.5. Potencial Zeta.....   | 85         |
| <b>3. DESENVOLVIMENTO DE BANCADAS DE TESTES</b> .....                      | <b>89</b>  |
| <b>3.1. Túnel de Vento</b> .....   | <b>89</b>  |
| 3.1.1. Descrição da Bancada.....   | 89         |
| 3.1.2. Metodologia de Testes .....   | 95         |
| <b>3.2. Torre de Poeira</b> .....  | <b>100</b> |
| 3.2.1. Descrição da Bancada.....   | 100        |
| 3.2.2. Descrição da Bancada.....   | 103        |
| <b>3.3. Incertezas experimentais nos testes em bancadas</b> .....          | <b>105</b> |
| <b>4. CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS</b> .....                                 | <b>107</b> |
| <b>4.1. Granulometria</b> .....  | <b>107</b> |

|   |            |
|---|------------|
| 4.1.1. Peneiramento .....   | 108        |
| 4.1.2. Difração a laser .....   | 109        |
| <b>4.2. Esfericidade .....</b>  | <b>110</b> |
| 4.2.1. Permeamtria .....  | 111        |
| 4.2.2. Análise de imagem dinâmica .....                                     | 113        |
| <b>4.3. Massa específica .....</b>  | <b>115</b> |
| 4.3.1. Determinação da massa específica aparente em função da umidade ..... | 116        |
| 4.3.2. Incertezas experimentais na caracterização das amostras .....        | 118        |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                                     | <b>119</b> |
| <b>5.1. Caracterização das amostras .....</b>                               | <b>119</b> |
| 5.1.1. Granulometria.....   | 119        |
| 5.1.2. Esfericidade.....  | 121        |
| 5.1.3. Massa Específica .....   | 123        |
| 5.1.4. Massa específica aparente em função da umidade .....                 | 123        |
| <b>5.2. Ensaios em Túnel de Vento .....</b>                                 | <b>125</b> |
| 5.2.1. Perda de massa em modelo de vagão .....                              | 125        |
| 5.2.2. Mecanismo de secagem do material .....                               | 129        |
| 5.2.3. Efeito de produtos químicos na supressão de poeira .....             | 133        |
| <b>5.3. Ensaios em Torre de Poeira.....</b>                                 | <b>136</b> |
| 5.3.1. Vazão de ensaio na torre de poeira .....                             | 136        |
| 5.3.2. Efeito da água na supressão de particulados em torre de poeira ..... | 137        |
| 5.3.3. Efeito de eletrólitos na supressão de particulados .....             | 142        |
| 5.3.4. <i>Pellet feed</i> moído.....  | 144        |
| 5.3.5. Pelotas .....  | 147        |
| 5.3.6. Pelotas com adição de 1% de finos .....                              | 151        |
| <b>6. CONCLUSÃO .....</b>   | <b>154</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                     | <b>159</b> |
| <b>APÊNDICES.....</b>   | <b>173</b> |
| <b>APÊNDICE A – Calibração da Célula de Carga.....</b>                      | <b>173</b> |
| <b>APÊNDICE B – Granulometria das amostras.....</b>                         | <b>176</b> |
| <b>APÊNDICE C – Massa Específica Aparente em Função da Umidade ...</b>      | <b>181</b> |
| <b>APÊNDICE D – Perda de Massa Total em Ensaios de Arrasto Eólico....</b>   | <b>184</b> |
| <b>APÊNDICE E – Efeito dos Produtos Químicos de Cobertura .....</b>         | <b>190</b> |
| <b>APÊNDICE F – Memorial de cálculo de carga elétrica. ....</b>             | <b>198</b> |
| <b>APÊNDICE G – Reagentes Eletrólitos em Solução Aquosa. ....</b>           | <b>199</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O manuseio, transporte e armazenamento de materiais a granel têm sido causa de crescente problemas sociais e ambientais, para indústrias e comunidades, devido à geração de poeira oriunda dessa atividade. É considerado poeira aquele particulado fino que possui maior propensão a ser transportado pelo ar por longas distâncias. A formação e emissão de poeira dependem do tipo de manuseio de material, da distribuição de tamanho de partículas geradas e das propriedades do material (WANGCHAI et al., 2013). A perda de material na forma de poeira é agravada à medida que as quantidades de materiais extraídos, processados e manuseados aumentam. Dentre os problemas associados à emissão de poeira, destacam-se (FREW et al., 2013):

- Perda de material valioso;
- Aumento das emissões de poeira no local de trabalho (minas, carregando e descarga, portos, etc.);
- Aumento dos custos diretos para a indústria (monitoramento, controle, manutenção mais frequentes, falha prematura de componentes, interrupção de processo, multas e avisos de prevenção, etc.);
- Deterioração da qualidade do ar ambiente e da saúde humana para trabalhadores e comunidades próximas.

Em função do risco associado à inalação de poeira, a regulamentação da qualidade do ar tem estabelecido padrões cada vez mais rigorosos. A agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (*Environmental Protection Agency* - EPA), estabelece padrões para regular a concentração de material particulado menores que 10 µm de diâmetro (MP<sub>10</sub>) desde 1987. Estudos posteriores apontaram que os maiores riscos à saúde não vêm apenas das partículas que são facilmente inaláveis, mas daquelas que se fixam no tecido pulmonar ou mesmo se difundem para o sangue. Cicatrizes e danos permanentes no tecido pulmonar podem ser consequência deste fenômeno. Diante disso, em 1997 a EPA adotou os primeiros padrões para material particulado com diâmetro igual ou inferior a 2,5 µm (MP<sub>2,5</sub>), sob a alegação de que estas partículas ficam retidas no tecido pulmonar, causando irritação ou necrose (COPELAND e KAWATRA, 2011).

Para o controle da emissão de poeira de minérios, o método mais utilizado é a adição de água ao material para aumentar sua umidade, reduzindo as chances que o particulado fino seja arrastado pelo vento e entre em suspensão. No entanto, a adição de umidade deve ser cuidadosamente controlada, uma vez que a quantidade excessiva de água pode reduzir o valor econômico do produto. Além do fator econômico, o controle da umidade do minério a ser transportado em navios é de suma importância para a operacionalidade e segurança do embarque, visando atender as regulamentações internacionais para o limite de umidade permitido. O parâmetro de controle internacional de umidade com a qual o minério pode ser embarcado é o TML (*Transportable Moisture Limit*). Valores de umidade acima do TML podem trazer graves danos à embarcação, podendo levar o navio até a naufragar (SOUZA PINTO et al., 2015). Problemas secundários também podem ocorrer quando a água é aplicada ao minério em grandes quantidades, como os relacionados ao manuseio devido à aderência do material em chutes de transferências, causando entupimentos, e nas paredes dos vagões ferroviários, dificultando a descarga do material (PLANNER, 2010).

A maioria dos produtos a granel perde a umidade por evaporação, infiltração e secagem, devido às condições de vento no ambiente. Como é difícil reabastecer continuamente a umidade perdida, uma alternativa é aplicar produtos químicos ao minério para minimizar a emissão de poeira (PLANNER, 2010). Alcançar um controle bem sucedido da poeira usando supressores de poeira tem sido um desafio importante, uma vez que existem escassez de normas que avaliam a capacidade de redução de poeira de materiais granulares. Por muito tempo acreditava-se que a chave para o controle eficaz de poeira residia na seleção de um supressor que molhasse as partículas finas com maior facilidade. No entanto, essa informação é mais aplicável para o caso de materiais com características hidrofóbicas, como o carvão (CHANDER et al., 1987; CRISTOVICI, 1991; KIM e TIEN, 1994), uma vez que estudos realizados com minério de ferro mostraram que soluções aquosas de surfactantes, as quais aumentam a molhabilidade, quando aplicadas ao minério de ferro, não inibiram a geração de poeira em extensão maior do que a simples utilização de água pura (COPELAND et al., 2009).

Atualmente existem duas normas internacionais para avaliar a tendência de um granel gerar poeira, as quais utilizam tambores rotativos. Além disso, outros métodos têm sido largamente utilizados para avaliar a emissão de poeira de graneis,

tais como: túneis de vento, que simulam várias condições de arrasto eólico em leito de partículas e a técnica de torre de poeira, que tenta reproduzir as condições de manuseio na indústria. Dentro desse contexto, este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de equipamentos e técnicas para a realização de ensaios de caracterização da emissão de poeira no manuseio e transporte de minérios, utilizando como base as técnicas existentes.

## **1.1. Justificativa**

Em praticamente todas as operações de movimentação de produtos a granel são observadas quantidades consideráveis de emissão de poeira. Nas minas, o efeito sobre as comunidades é menor, uma vez que esse tipo de empreendimento está, geralmente, localizado longe das cidades vizinhas. No entanto, durante o transporte em vagões de trens que passam por diversas cidades ao longo da ferrovia e nas operações em portos, esse efeito é bem mais acentuado. Como consequência dessas emissões de poeira de minério, em 2016 o porto de Tubarão (ES) teve suas atividades suspensas devido à grande quantidade de poeira que é emitida pelo porto, chamado popularmente de “pó preto”, causando grandes prejuízos econômicos às empresas que compõem o complexo de Tubarão.

Diversos métodos de supressão de poeira são utilizados pelas indústrias, como precipitadores inerciais, separadores centrífugos, filtros de mangas, umidificação com água, solução surfactantes e polímeros, entre outros. A utilização da água para umidificação do minério ainda é um método bastante utilizado, embora o uso de produtos químicos em solução aquosa tem sido largamente implantado nas plantas industriais. No entanto, alcançar um controle bem sucedido do material particulado, usando supressores comerciais de poeira, tem sido um desafio importante. Parte do problema está relacionado à escassez de normas que possam avaliar os fatores que contribuem para a emissão de poeira do minério e o tipo adequado de supressor a ser utilizado em cada caso.

Diante a escassez de equipamentos e técnicas disponíveis na literatura, adequados para a caracterização da emissão de poeira de minérios, em 2015, o Instituto Tecnológico Vale (ITV) iniciou uma parceria com a Universidade Federal do

Pará (UFPA), com o intuito de estudar os mecanismos de geração de poeira e desenvolver instrumentos e metodologias confiáveis para testes de novas soluções para o controle de poeira oriundos das atividades com minério de ferro e carvão. Portanto, este trabalho é fruto das pesquisas desenvolvidas entre o ITV e a UFPA, o qual justifica-se a necessidade de se elaborar técnicas confiáveis para caracterizar diversas formas de supressão de poeira durante o transporte e o manuseio de minérios.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Desenvolver equipamentos e técnicas para a realização de ensaios de caracterização da emissão de poeira no manuseio e transporte de minérios.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Desenvolver infraestrutura laboratorial para estudos relacionados ao mecanismo de emissão de poeira de materiais particulados;
- Elaborar metodologias para realização dos ensaios de caracterização da emissão de poeira no manuseio e transporte de minérios;
- Avaliar a influência dos fatores inerentes ao ambiente e ao material, associados a geração de poeira;
- Avaliar a eficiência da umidade e de supressores químicos no controle de emissão de poeira.

## **1.3. Estrutura do trabalho**

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo introduz o assunto do trabalho e apresenta os objetivos da dissertação.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica que, inicialmente, contextualiza a cadeia de suprimento do minério de ferro e carvão no Brasil, apresentando a logística de exportação e os equipamentos utilizados desde as minas até o embarque em navios. Em seguida, é feita uma revisão do efeito do material particulado à saúde humana, e as regulamentações para esse tipo de poluente, dos principais parâmetros associados a geração de poeira, dos mecanismos de controle mais utilizados na indústria e das técnicas existentes para avaliação da emissão de poeira de minérios.

No capítulo 3 é feita a descrição do desenvolvimento das bancadas em Túnel de Vento, para avaliar o arrasto eólico de leito de partículas em modelo de vagão, e Torre de Poeira, desenvolvida para avaliar a emissão de poeira em condições dinâmicas de manuseio. São apresentados os critérios de projeto, o princípio de funcionamento, os equipamentos que compõem cada bancada, e os procedimentos experimentais para os ensaios realizados.

O capítulo 4 detalha as técnicas e procedimentos utilizados para a caracterização das amostras, destacando-se os ensaios de granulometria, esfericidade e massa específica real e massa específica aparente em função da umidade do material.

No capítulo 5 são apresentados os resultados e discussões resultantes dos ensaios de caracterização dos materiais, ensaios em túnel de vento e em torre de poeira.

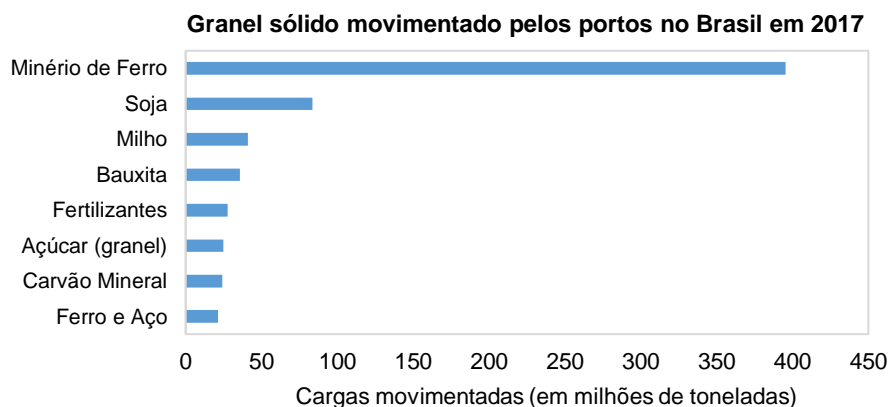
Finalmente, o capítulo 6 é a conclusão do trabalho, apresentando também algumas propostas de trabalhos futuros, que podem ser desenvolvidas a partir deste trabalho.



## 2. FUNDAMENTOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

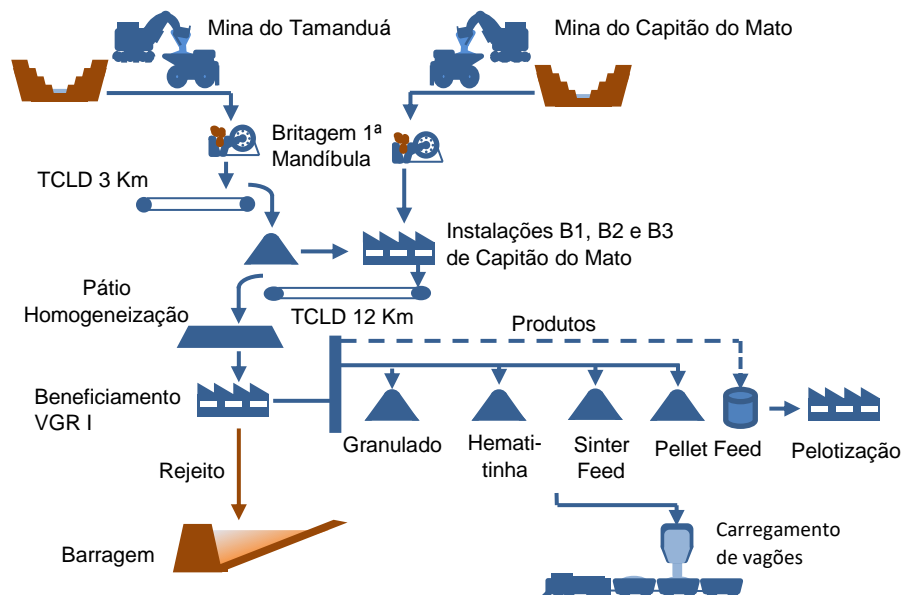
### 2.1. A Cadeia de Suprimento do Minério de Ferro e Carvão

A mineração é o ato de extração de substâncias minerais de rochas e solos, sendo uma atividade extremamente lucrativa e importante para o desenvolvimento das sociedades a séculos. Os minérios são matérias-primas essenciais na construção civil e na produção de insumos para a produção de bens de consumo, máquinas e equipamentos, os quais são utilizados na produção de novos bens de consumo. Historicamente, o Brasil sempre teve uma relação próxima com a procura e utilização de recursos minerais existentes no território nacional, os quais sempre tiveram grande peso na balança comercial do país, com destaque para o minério de ferro (LOPES, 2016). Segundo a ANTAQ (2018a), o setor portuário brasileiro movimentou 1,086 bilhão de toneladas em 2017, correspondendo a um crescimento de 8,3% em relação a 2016, quando foram movimentadas 1,002 bilhão de toneladas. O granel sólido foi a carga que teve maior destaque, movimentando 695,4 milhões de toneladas movimentadas em 2017, um incremento de 10,3%, em relação ao ano anterior. A Figura 2.1 mostra as principais cargas a granel movimentadas em 2017, destacando ainda a presença da bauxita e carvão mineral, com o minério de ferro representando 36,4% das exportações brasileiras em 2017. Portanto, o minério de ferro possui grande participação nas movimentações de carga do país, com significativa importância para o produto interno bruto (PIB) brasileiro.



**Figura 2.1 – Graneis sólidos movimentados pelos portos do Brasil em 2017.**  
**Fonte: ANTAQ, 2018b (Adaptado).**

São nas jazidas que o minério de ferro é encontrado na natureza em forma de rochas, misturado ou não a outros minerais. A exploração ocorre nas minas onde é feita a separação do material útil do material que não tem valor (ganga). Desde a extração das rochas até a obtenção do ferro propriamente dito, o minério passa por diversos processos industriais, para ser beneficiado e, posteriormente, ser vendido para as indústrias siderúrgicas. O processo inicia-se pela retirada do minério das minas por meio de escavadeiras, que o carrega em caminhões, e transportam para instalações de britagem, reduzindo os grandes blocos em pequenos fragmentos. Em seguida o minério é peneirado para classificação por tamanho. Se necessário, o minério é submetido à concentração, para aumento do seu teor. O minério produzido geralmente é transportado em vagões de trens em ferrovias, sendo o meio de transporte de menor custo na extração do ferro (LOPES, 2014). A Figura 2.2 apresenta o fluxograma resumido da produção de diferentes tipos de minério de ferro, na mina de Vargem Grande (MG).



**Figura 2.2 – Produção de minérios de ferro em Vargem Grande/MG.**  
**Fonte: VALE, 2016a.**

Segundo Lopes (2016), o minério de ferro no Brasil é explorado, principalmente, em três regiões. São elas:

- Quadrilátero ferrífero, no estado de Minas Gerais, responsável pela extração e produção em grande quantidade, do minério de ferro e do manganês, além de produzir bauxita e cassiterita em quantidades não tão expressivas;

- Maciço do Urucum, no estado do Mato Grosso do Sul, localizada as margens do rio Paraguai, no Pantanal, produz, modestamente, minério de ferro e manganês;
- Serra dos Carajás, no estado do Pará, a qual é, atualmente, a maior província mineral do mundo e possui uma importante quantidade e variedade, de minérios que são utilizados nas indústrias de base de todo o país, com extrema abundância de minério de ferro e de outros minerais como níquel, cobre, estanho e ouro.

A Vale/SA é a maior produtora de minério de ferro do Brasil. O minério é produzido em quatro sistemas: Norte, Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Os sistemas Norte, Sul e Sudeste são integrados, compostos por mina, ferrovia e porto. A Tabela 2.1 apresenta a produção de minério de ferro de cada sistema para os anos de 2016 e 2017. O Sistema Norte tem destaque entre os demais por possuir a maior produção de minério de ferro, 169.152,00 mil toneladas em 2017.

**Tabela 2.1 – Produção de minério de ferro no Brasil.**

| <b>Produção (mil toneladas métricas)</b> |                 |             |             |
|--|-----------------|-------------|-------------|
| <b>Sistema</b>                           | <b>Site</b>     | <b>2016</b> | <b>2017</b> |
| Norte                                    | Carajás         | 147.743,0   | 146.968,0   |
|  | S11D            | 380,0       | 22.184,0    |
|  | Total           | 148.123,0   | 169.152,0   |
| Sudeste                                  | Itabira         | 33.357,0    | 37.837,0    |
|  | Minas Centrais  | 40.941,0    | 37.651,0    |
|  | Mariana         | 28.437,0    | 33.064,0    |
|  | Total           | 102.735,0   | 108.552,0   |
| Sul                                      | Paraopeba       | 26.404,0    | 26.287,0    |
|  | Vargem Grande   | 29.151,0    | 23.264,0    |
|  | Minas Itabirito | 40.131,0    | 36.871,0    |
|  | Total           | 95.686,0    | 86.422,0    |
| Centro-Oeste                             | Urucum          | 367,0       | -           |
|  | Corumbá         | 1.937,0     | 2.417,0     |
|  | Total           | 2.304,0     | 2.417,0     |

**Fonte: Vale, 2017a.**

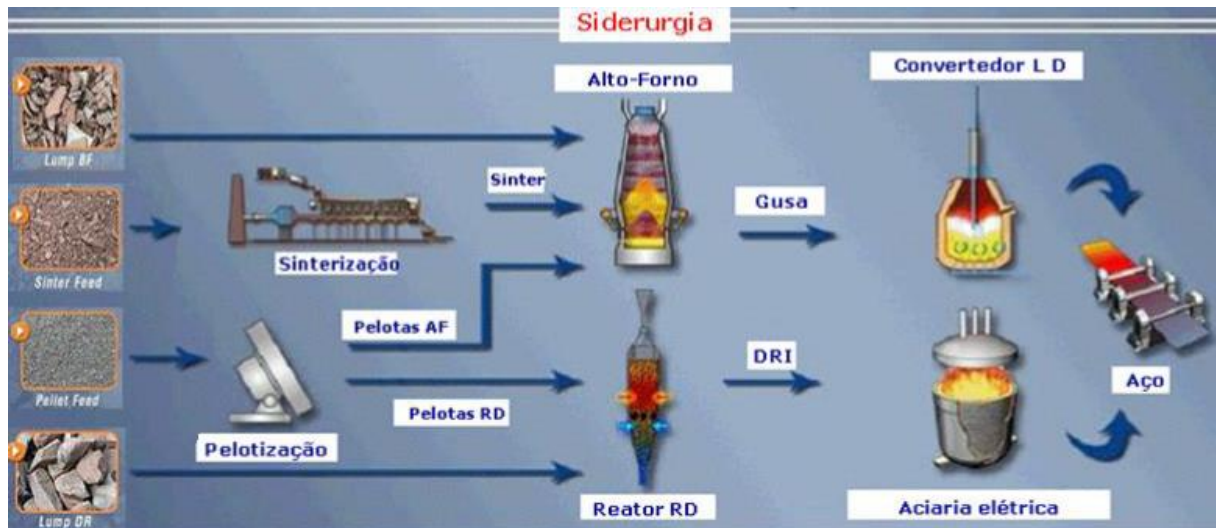
O minério produzido no Brasil é então vendido para o mercado externo (em sua maior parte) e para o mercado interno. Entre os principais compradores destacam-se a China, com quase metade de toda produção, seguido do Japão, Coreia do Sul, Holanda, Itália e muitos outros. China e a Austrália, também são grandes produtoras de minério de ferro, apesar de seus minérios não apresentarem a mesma qualidade dos encontrados no Brasil (LOPES, 2016). O custo do frete entre Brasil/China e Austrália/China se situa em torno de US\$ 12/t e de US\$ 6/t, respectivamente, garantindo uma grande vantagem ao minério australiano. No entanto, de forma estratégica, a Vale implementou navios da série Valemax, com capacidade de transporte de 400 mil toneladas, e Centros de Distribuição (Omã e Malásia), reduzindo o valor do frete e ajustando a qualidade do minério entregue para o seu principal mercado consumidor. Dessa forma, para entregar um produto adequado às demandas de mercado, os centros de distribuição recebem minérios de menor qualidade (Sistema Sudeste) e realiza o processo de mistura (blendagem) com um minério premium (Sistema Norte), chegando a um produto intermediário que gera maior valor para a Vale (HEIDER, 2017). A Figura 2.3 apresenta essa cadeia integrada de valor global da Vale.



**Figura 2.3 – Cadeia integrada de valor global da Vale.**  
**Fonte: Vale, 2016b.**

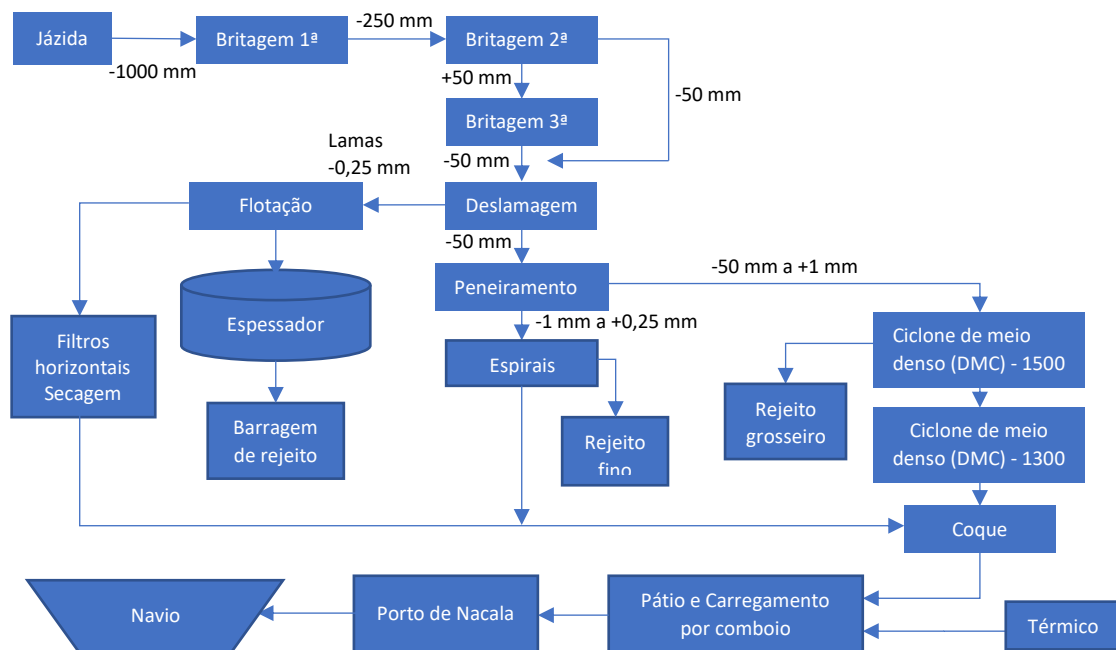
A siderurgia é o principal setor requisitante de minério de ferro do mundo, chegando a adquirir mais de 70% de toda a produção anual das minas. Essa enorme quantidade utilizada pela siderurgia deve-se ao fato de que o minério de ferro é a

principal matéria-prima na produção do aço, encontrado nos automóveis, nas estruturas civis, nas máquinas e nos eletrodomésticos em geral (LOPES, 2016). De uma forma simplificada, o processo de siderurgia é feito a partir da mistura de diferentes componentes, tais como o minério de ferro (na forma de granulado, pelota e *sínter feed*), calcários (fundentes), além de combustíveis (carvão ou coque) para a queima. Esses componentes são aglomerados e então levados ao alto-forno (AF), onde é feita a redução e a fusão dos componentes e o ferro gusa é produzido. Antes de serem levados ao alto forno, os finos de minério de ferro e o carvão são previamente preparados para melhoria do rendimento e economia do processo. O minério fino é transformado em pelotas e o carvão é destilado, para obtenção do coque. As pelotas são pequenas esferas de minério de ferro produzidas a partir do fino do minério de ferro, denominado *pellet feed*. A tecnologia de produção é denominada de pelotização. A utilização das pelotas no alto forno aumenta a permeabilidade do leito de minério dentro do alto-forno, facilitando a circulação do ar quente utilizado no processo de redução e fusão dos componentes, além de evitar que o material seja esmagado e obstrua o alto-forno, uma vez que a pelota possui maior resistência mecânica em relação ao minério de ferro (MOURÃO, 2017). Além do minério de ferro, a indústria siderúrgica depende em larga escala do carvão mineral metalúrgico que representa uma grande parcela do custo final do aço produzido. O carvão exerce duplo papel na fabricação do aço: como combustível, permite alcançar altas temperaturas (cerca de 1.500°C) necessárias à fusão das pelotas, e como redutor, através da geração de CO<sub>2</sub>. O agente redutor utilizado na siderurgia é o coque, proveniente do carvão mineral. O carvão mineral para siderurgia a coque, é denominado carvão coqueificável, que é uma substância essencial na redução do minério de ferro a ferro metálico, pois combina com o oxigênio, na presença de calcário, criando dióxido de carbono, ferro e escória. No processo de redução, o ferro se liquefaz e é chamado de ferro gusa ou ferro de primeira fusão. Impurezas como calcário, sílica, etc., formam a escória, que é matéria-prima para a fabricação de cimento (MORAIS, 2008). A Figura 2.4 ilustra o processo de produção do aço.



**Figura 2.4 – Processo de produção do aço na indústria siderúrgica.**  
**Fonte: Mourão, 2017.**

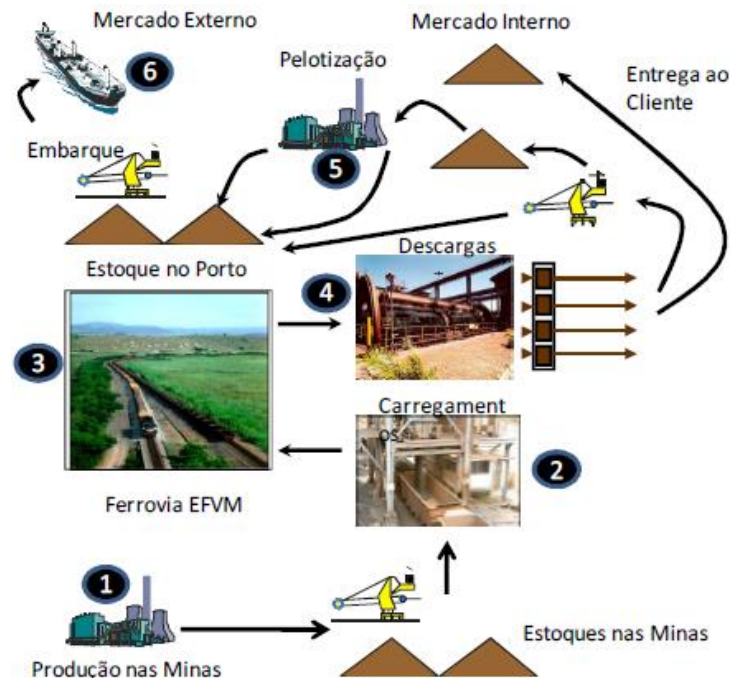
Assim como em outros países, o carvão mineral no Brasil também é explorado, porém em menor escala. Atualmente a maior produção desse carvão no Brasil está situada na região sul. As principais reservas de carvão já identificadas integram os estados de Santa Catarina, Paraná, Rio Grande do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Bahia, entre outros estados que produzem o carvão em menor quantidade (LOPES, 2017). Devido à baixa qualidade do carvão mineral brasileiro, o país necessita importar de outros países. Entre os países que suprem o Brasil com carvão mineral está a África do Sul, EUA e Austrália. Quando comparado o primeiro semestre de 2017 com o primeiro semestre de 2016, em relação ao valor das importações, houve um aumento da participação do carvão de 34,3% para 51,8%, representando um aumento de 130,7% entre os dois semestres (DNPM, 2017). A Vale, maior produtora mundial de minério de ferro e pelotas, também está presente no segmento de carvão mineral na mina de Moatize, em Moçambique, desde julho de 2011. Em 2017, a mina de Moatize produziu um total de 11.260 mil toneladas de carvão, sendo 6.953 mil toneladas de carvão coqueificável e 4.307 mil toneladas de carvão térmico. A Figura 2.5 mostra um fluxograma resumido da produção de carvão em Moatize, o qual é exportado para vários outros países, incluindo o Brasil (VALE, 2017a).



**Figura 2.5 – Fluxograma resumido da produção de carvão em Moatize.**  
**Fonte: Vale, 2016a.**

As minas de minério de ferro e carvão, geralmente, não estão localizadas próximas aos portos onde são carregados nos navios para exportação. Diante disso, é necessário criar uma logística capaz de realizar este transporte das minas, passando pela ferrovia e chegando até os portos, para ser armazenado e carregado no navio. Todo processo começa nas minas, onde é feita a extração, beneficiamento e estocagem do minério. Em seguida, o minério é levado até os silos de carregamento dos vagões de trem, para ser transportado pela ferrovia. Quando chegam aos portos, os vagões são descarregados pelos viradores de vagões. Nestes equipamentos o minério cai em uma correia transportadora, sendo direcionado para estocagem do porto e/ou para o estoque das usinas de pelletização. De modo geral, não é possível descarregar os materiais dos vagões diretamente nos compartimentos dos navios, pois o fluxo de trens chegando ao porto não acompanha o ritmo de chegada dos navios, tornando necessário o armazenamento em pátios de estocagem no porto, para posteriormente encaminhar o minério ao navio. Após descarga no porto, o minério é estocado e misturado em pilhas antes de ser finalmente embarcado. O processo de mistura combina minérios com diferentes características visando atender às especificações mínimas exigidas pelos clientes. Nas usinas de pelletização, os finos de minério de ferro são utilizados para produzir as pelotas de minério de ferro. Por fim, temos os píeres para carregamento de navios, onde o minério ou a pelota são

transportados, através de um sistema de transportadores de correia, dos estoques do porto e das usinas e embarcadas em navios (MEIRELES, 2010). Portanto, o trajeto entre a mina e o navio envolve diversas operações de manuseio, transporte e estocagem, como ilustrado pela Figura 2.6, que apresenta a cadeia de suprimento do minério de ferro do sistema sudeste da Vale no Brasil.



**Figura 2.6 - A cadeia de suprimento do minério de ferro no Sistema Sudeste.**  
**Fonte: Meireles, 2010.**

Nesta cadeia de suprimento do minério de ferro, máquinas e equipamentos de grande porte são utilizados para movimentar o material, estocando-o de forma a facilitar seu posterior carregamento em vagões ou no navio. Todas essas etapas de movimentação são susceptíveis a geração de poeira. De acordo com Cardoso (2011), os processos de manuseio do minério envolvem os seguintes equipamentos:

- **Silo de carregamento de vagões:** o carregamento dos vagões de trem com minérios é geralmente feito via silos (Figura 2.7), sendo um processo automatizado e que possui menor variabilidade de carga entre os vagões, tornando o processo mais uniforme e mais ágil do que o carregamento via pá-mecânica que é um processo manual, e que depende da disponibilidade de equipamentos que muitas vezes são compartilhados com outras atividades (BARROS, 2008);





**Figura 2.7 – Carregamento de Vagões.**  
**Fonte: Meireles, 2010.**

- **Virador de vagões:** ao chegar no porto, o vagão carregado com minério passa pelo virador de vagões (Figura 2.8), o qual realiza o semi-giro (aproximadamente 180°) do vagão, em seu eixo longitudinal, de forma a despejar o minério que está dentro dele no alimentador de sapatas (TAVARES, 2012);



**Figura 2.8 – Virador de vagões.**  
**Fonte: Vale, 2016c.**

- **Transportadores de correia:** seja nas minas ou nos portos, os transportadores de correia (Figura 2.9) são largamente utilizados, não apenas para transportar o minério do local onde este é retirado dos vagões até o local onde será estocado no pátio de armazenagem, mas também para encaminhar o minério deste pátio para o carregamento no navio. Aliado aos chutes de transferências, permitem a movimentação de minério pelas instalações da mina e porto (MEIRELES, 2010);



**Figura 2.9 – Transportador de correia.**  
**Fonte: Burns, 2019.**

- **Empilhadeira:** após passar pelo transportador, o minério precisa ser empilhado de forma a otimizar o espaço do pátio, armazenando a maior quantidade possível de minério no espaço físico disponível, adequando a qualidade da pilha formada e facilitando a movimentação do minério. A empilhadeira (Figura 2.10) percorre o pátio de minério em cima de trilhos (EXAME, 2016);



**Figura 2.10 – Empilhadeira.**  
**Fonte: Exame, 2016.**

- **Recuperadora:** a recuperadora (Figura 2.11) possui a função contrária da empilhadeira, sendo então utilizada para retomar o minério que foi anteriormente armazenado em pilhas nos pátios, utilizando um mecanismo de roda de caçambas que escavam a pilha e depositam o minério nos transportadores de correias, para que seja encaminhado ao carregador de navios. A recuperadora, assim como a empilhadeira, percorre o pátio de minério em cima de trilhos (TESTATO, 2016);



**Figura 2.11 – Recuperadora.**  
**Fonte: Testato, 2016.**

- **Carregador de navios:** os transportadores de correia conduzem o minério recuperado do pátio até o píer, onde está localizado o carregador de navios (Figura 2.12), que é o equipamento responsável por efetuar o embarque do minério nos navios. Há também a possibilidade de fazer o caminho oposto, com uma máquina semelhante ao carregador, porém com a finalidade de recuperar o minério dos navios recém-atracados nos portos. É o chamado descarregador de navios (VALE, 2017c).



**Figura 2.12 – Carregamento de navios.**  
**Fonte: Vale, 2017c.**

O gerenciamento de um pátio de minério em portos envolve as operações de descarga de minérios no pátio, organização e disposição das pilhas de armazenagem e a recuperação do minério para embarque nos navios. O pátio, em geral, fica a céu aberto e possui grandes dimensões, permitindo o armazenamento de grandes quantidades de minério, na configuração de pilhas que possuem tamanhos variados

dependendo do terminal (MEIRELES, 2010). Segundo Cardoso (2011), as operações de carga e descarga são mais fáceis e eficientes quando as dimensões das pilhas são grandes porque permite que o maquinário opere por mais tempo com menor número de manobras, gerando um ganho energético e logístico. Porém, se o pátio estiver muito cheio, isto limita o acesso às pilhas, podendo gerar perda de flexibilidade quanto ao minério a ser retomado e podendo dificultar o acesso para intervenções de manutenção. Outra função dos pátios de estocagem é a homogeneização das pilhas e a formação de pilhas que atendem às especificações para cada tipo de minério a ser embarcado. A Figura 2.13 ilustra um exemplo de pátio de armazenamento de minérios.



**Figura 2.13 - Pátio de armazenamento de minério.  
Fonte: Tavares, 2012.**

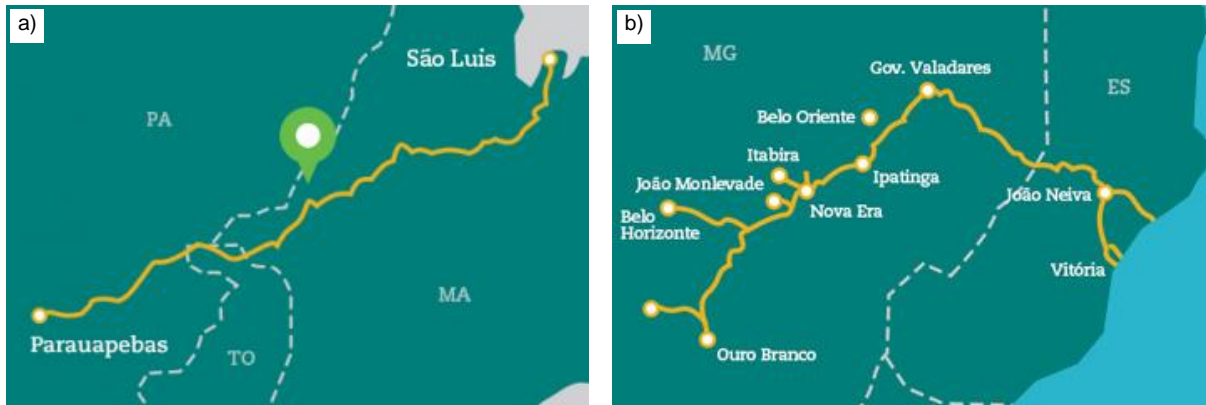
Devido às grandes distâncias entre as minas e os portos, e ao grande volume de minério movimentado diariamente, a utilização do transporte ferroviário é mais viável economicamente. O transporte de minério de ferro e carvão, normalmente, usa grandes vagões abertos, conforme mostra a Figura 2.14. Segundo Planner (2010), essas grandes distâncias, percorridas pelos trens, aliadas à superfície de material exposta ao vento e condições climáticas adversas, e às propriedades de cada material são fatores-chaves para a emissão de poeira.





**Figura 2.14 - Transporte ferroviário de minério de ferro.**  
**Fonte: Vale, 2015.**

No Brasil, as duas principais ferrovias utilizadas para o transporte de minério de ferro: a Estrada de Ferro Carajás (EFC) e a Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM). A EFC, inaugurada em 1985, possui 892 quilômetros de extensão, pertence ao Sistema Norte da Vale, ligando a maior mina de minério de ferro a céu aberto do mundo, em Carajás, no sudeste do Pará, ao porto de Ponta da Madeira, em São Luís (MA). Por seus trilhos, são transportados 120 milhões de toneladas de carga e 350 mil passageiros por ano. A velocidade média dos trens é de 40 km/h (VALE, 2017b). A EFVM, criada em 1904, pertence ao Sistema Sudeste da Vale e está entre as principais ferrovias do mundo e é um dos elos da cadeia de suprimentos do minério de ferro. Com 905 quilômetros de extensão, passando por diversas cidades entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, transporta cerca de 40% da carga ferroviária brasileira. São mais de 135 milhões de toneladas de carga transportada por ano (VALE, 2015). Desse total, 80% são formados de minério de ferro e os outros 20% por mais de 60 diferentes tipos de produtos, como aço, carvão, calcário, granito, contêineres, ferro-gusa, produtos agrícolas, madeira, celulose, entre outros. O minério de ferro é levado das minas no estado de Minas Gerais em direção ao porto de Tubarão para exportação, e retorna com os vagões vazios para novos carregamentos de minério de ferro ou carregados com carvão que são importados para suprir a indústria siderúrgica (MEIRELES, 2010). A Figura 2.15 apresenta os trajetos feito pela EFC e EFVM.



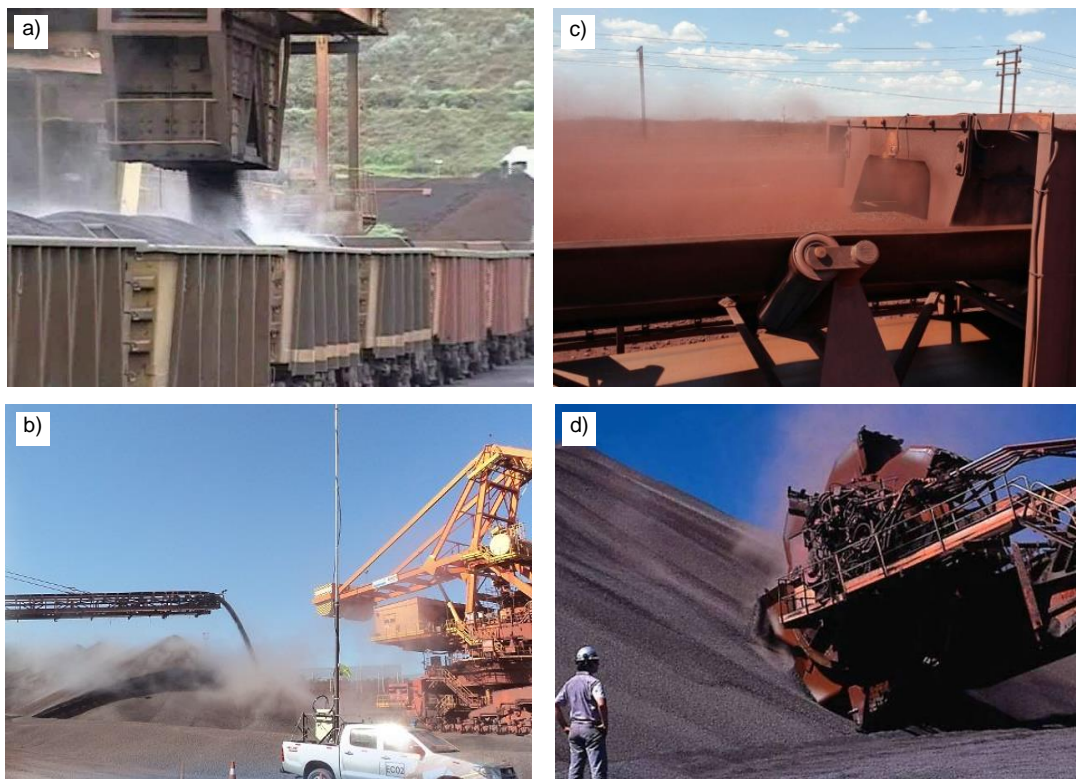
**Figura 2.15 – Linha ferroviária da (a) EFC e (b) EFVM.**  
**Fonte: (a) Vale, 2018a; (b) Vale, 2015.**

No caso da EFVM, em que a ferrovia passa por várias cidades da mina ao porto, a geração de poeira durante o transporte de minério de ferro tem sido objeto de reclamações das comunidades adjacentes ao traçado da linha férrea. A estratégia utilizada pela Vale para diminuir essa geração de poeira tem sido a de aplicar sobre a carga do material embarcado nos vagões um produto químico, em solução aquosa, a base de polímero. Essa aplicação é feita junto às minas, imediatamente após o embarque do minério nos vagões, e durante o trajeto, na localidade de Resplendor-MG (LEAL FILHO et al., 2011).

## **2.2. Influência da Emissão de Particulados na Qualidade do Ar**

O manuseio e o transporte de minérios geram um impacto muito grande no ambiente, propiciando a geração de poluição atmosférica, devido à grande quantidade de material particulado que é gerado na ausência de controles ambientais adequados. Isto ocorre porque praticamente todas as operações de movimentação (descarga, transporte e armazenagem) suspendem o material particulado fino do minério, incluindo a constante ação dos ventos sobre as pilhas de armazenamento de minérios e sobre outras áreas cobertas por poeiras, como as vias de acesso (GUEDES, 2005). A emissão de particulados é bem mais acentuada quando os granéis sólidos se encontram pouco úmidos, uma vez que a baixa umidade torna as partículas mais leves e suscetíveis à dispersão (CORSON e FISHER, 2009). A poluição do ar ligada ao manuseio de minérios afeta diretamente a qualidade do ar, podendo atingir

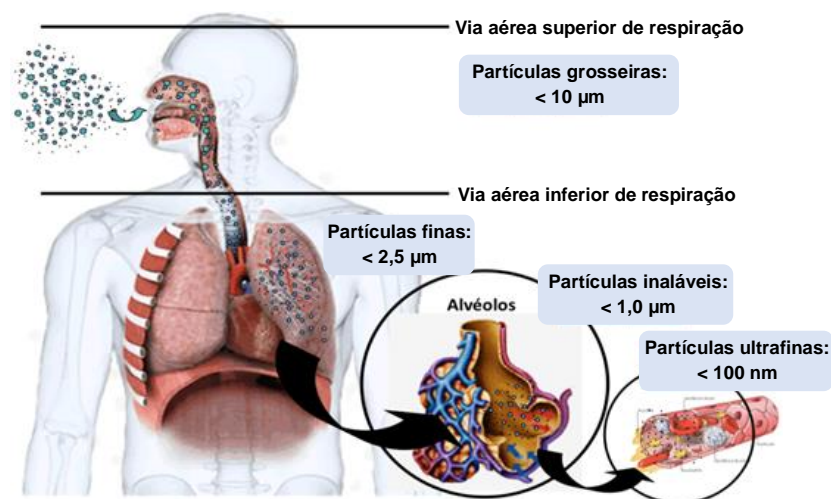
comunidades próximas, pois o particulado de minério é muito fino e pode viajar distâncias consideráveis pelo ar. Essa poluição atmosférica pode, então, gerar graves riscos à saúde, como problemas respiratórios tanto para os trabalhadores quanto para as comunidades que vivem próximo às instalações industriais. Além disso, há os impactos de menor efeito devido à baixa visibilidade, deposição de poeira nas superfícies das casas, carros, barcos e estruturas em geral (PLANNER, 2010). Durante o transporte em vagões de trens que passam por diversas cidades ao longo da ferrovia e nas operações em portos, esse efeito pode ser mais acentuado. Os portos armazenam seus granéis sólidos, como os minérios, em pilhas de estocagem, geralmente a céu aberto e em grandes pátios de modo que estes ficam sujeitos aos ventos e às chuvas (CORSON e FISHER, 2009). A Figura 2.16 apresenta algumas das situações de manuseio em que a emissão de poeira é mais frequente.



**Figura 2.16 – Emissão de poeira em operações com minérios.**  
**Fonte: (a) Barros, 2008; (b) Ecosoft, 2018; (c) DAS, 2018; (d) Exame, 2017.**

O material particulado (MP) pode ser classificado por seu diâmetro aerodinâmico, que por definição é o diâmetro de uma esfera de densidade unitária que teria velocidade de sedimentação idêntica à da partícula. Dentre os vários poluentes atmosféricos, o MP se destaca por apresentar um grande potencial poluidor

devido ao fato de estar associado à quase todas as atividades mineiras, sendo constituído de poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho, geralmente com diâmetro de partícula inferior a  $100\ \mu\text{m}$ , as quais são definidas como Partículas Totais em Suspensão (PTS). As partículas com um diâmetro aerodinâmico de  $10\ \mu\text{m}$  ou menor ( $\text{MP}_{10}$ ), denominam-se como material particulado suspenso respirável, que permanece na atmosfera por longos períodos, pois possui baixa velocidade de deposição. As partículas inaláveis são aquelas com diâmetro menor que  $2,5\ \mu\text{m}$ , chamadas de  $\text{MP}_{2,5}$  (LOUREIRO, 2005). A maior parte dos trabalhos científicos sobre a presença de material particulado na atmosfera está relacionada a partículas menores que  $10\ \mu\text{m}$ , uma vez que os maiores riscos à saúde não vêm apenas das partículas que são facilmente inaláveis, mas daquelas que se fixam no tecido pulmonar, causando efeitos negativos sobre a saúde pulmonar dos seres humanos, como irritação ou necrose (EPA, 2017). A Figura 2.17 ilustra como os diferentes tamanhos de material particulado se alojam no sistema respiratório humano.



**Figura 2.17 – Deposição de material particulado no tecido pulmonar humano.**  
**Fonte: Guarieiro, L. e Guarieiro, A. (2013).**

Os padrões de qualidade do ar são determinados por limites das concentrações de poluentes atmosféricos que, se ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos a flora e à fauna, e ao meio ambiente em geral. Esses padrões são divididos em padrões primários e secundários. Padrões primários de qualidade do ar são as concentrações de poluentes que, se ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população, e os



padrões secundários de qualidade do ar são para as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano a flora e à fauna, e ao meio ambiente em geral (CONAMA, 2017). Em todo o mundo, agências oficiais e organizações não governamentais avaliam a qualidade do meio ambiente através do desenvolvimento de metodologias, legislação apropriada e monitoramento contínuo de espécies poluidoras, tal como a Agência de Proteção Ambiental norte-americana (EPA), sendo a primeira a implementar a padronização dos níveis de particulados no ar atmosférico, em 1971. Isto foi resultado de indícios que a exposição ao material particulado em suspensão no ar resulta em significativos malefícios à saúde.

Os primeiros padrões instituídos em 1971 regulamentaram as concentrações de partículas totais em suspensão (PTS), os quais estabeleceram limitações sobre a quantidade de poeira no ar. No entanto, outros estudos indicaram que esses padrões não limitavam as emissões de particulados específicos no ar, os quais eram os prováveis causadores de distúrbios pulmonares. Como resultado, as normas de emissão de poeira no ar foram modificadas para incluir uma classe de partículas de tamanho muito específica, o  $MP_{10}$ . Em 1987, resultados de pesquisas levaram a modificações nos padrões de emissão, os quais indicaram que partículas de  $MP_{10}$  apresenta maior tendência a serem transmitidas aos pulmões à medida que o ar é inalado. Em 1997, com o avanço das pesquisas, concluiu-se que as partículas de  $MP_{2,5}$  eram aquelas realmente incorporadas nos tecidos do pulmão, causando irritação do tecido e os padrões para esse tamanho de partículas foram então implementados. Em função do risco associado à inalação de poeira, a regulamentação da qualidade do ar tem estabelecido padrões cada vez mais rigorosos. Em 2006, a EPA modificou ainda mais os padrões atuais de emissão de material particulado, para refletir a compreensão crescente de efeitos adversos para a saúde devido à inalação de poeira. A Tabela 2.2 apresenta a evolução dos padrões de qualidade do ar ao longo dos anos, até os padrões atualmente vigentes.

**Tabela 2.2 – Evolução dos padrões de qualidade do ar definidos pela EPA.**

| Ano          | Indicador         | Padrão                          | Tempo médio | Níveis de emissão     | Regulamentação   |
|--------------|-------------------|---------------------------------|-------------|-----------------------|--|
| 1971         | PTS               | Primário                        | 24 horas    | 260 µg/m <sup>3</sup> | Não deve ser excedido mais de uma vez por ano                            |
|              |                   | Secundário                      | 24 horas    | 150 µg/m <sup>3</sup> |  |
|              |                   | Primário                        | Anual       | 75 µg/m <sup>3</sup>  | Média anual  |
|              |                   | Secundário                      | Anual       | 60 µg/m <sup>3</sup>  |  |
| 1987         | MP <sub>10</sub>  | Primário e Secundário idênticos | 24 horas    | 150 µg/m <sup>3</sup> | Não deve ser excedido mais de uma vez por ano, em média, durante 3 anos  |
|              |                   |                                 | Anual       | 50 µg/m <sup>3</sup>  | Média aritmética anual, ao longo de um período de 3 anos                 |
| 1997         | MP <sub>2,5</sub> | Primário e Secundário idênticos | 24 horas    | 65 µg/m <sup>3</sup>  | 98% da média diária, ao longo de um período de 3 anos                    |
|              |                   |                                 | Anual       | 15 µg/m <sup>3</sup>  | Média aritmética anual, ao longo de um período de 3 anos                 |
|              | MP <sub>10</sub>  | Primário e Secundário idênticos | 24 horas    | 15 µg/m <sup>3</sup>  | 99% da média diária, ao longo de um período de 3 anos                    |
| 2006         | MP <sub>2,5</sub> | Primário e Secundário idênticos | 24 horas    | 35 µg/m <sup>3</sup>  | 98% da média diária, ao longo de um período de 3 anos                    |
|              |                   |                                 | Anual       | 15 µg/m <sup>3</sup>  | Média aritmética anual, ao longo de um período de 3 anos                 |
|              | MP <sub>10</sub>  | Primário e Secundário idênticos | 24 horas    | 150 µg/m <sup>3</sup> | Não deve ser excedido mais de uma vez por ano, em um período de 3 anos   |
| 2012 (Atual) | MP <sub>2,5</sub> | Primário                        | Anual       | 12 µg/m <sup>3</sup>  | Média anual, ao longo de um período de 3 anos                            |
|              |                   | Secundário                      | Anual       | 15 µg/m <sup>3</sup>  |  |
|              |                   | Primário e Secundário           | 24 horas    | 35 µg/m <sup>3</sup>  | 98% da média diária, ao longo de um período de 3 anos.                   |
|              | MP <sub>10</sub>  | Primário e Secundário           | 24 horas    | 150 µg/m <sup>3</sup> | Não deve ser excedido mais de uma vez por ano, em média, durante 3 anos. |

**Fonte: EPA, 2016; EPA, 2020 (Adaptado).**

No Brasil, os padrões de qualidade do ar foram definidos a partir das Resoluções nº 005 de 1989 e nº 003 de 1990, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que instituíram, respectivamente, o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR) e os limites e padrões de qualidade do ar atmosférico, de forma a criar uma rede de monitoramento e regulação com o objetivo de melhorar a qualidade do ar, sendo, portanto, considerado ação estratégica, complementar e referencial aos limites máximos de emissão de poluentes (IEMA, 2019). Dessa forma, os empreendimentos e operações que emitem poluentes atmosféricos, de elevado

porte, como grandes portos que movimentam granéis sólidos e/ou líquidos, precisam estruturar mecanismos que reduzam esta emissão, de forma a cumprir a legislação vigente (REGATTIERI, 2010). A Figura 2.18 apresenta os atuais padrões de qualidade do ar no Brasil, definidos na Resolução Conama N° 491/2018.

| Poluente Atmosférico           | Sigla             | Período de Referência | PI-1                         | PI-2                         | PI-3                         | PF                           | ppm |
|--------------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----|
|                                |                   |                       | ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |     |
| Material Particulado           | MP <sub>10</sub>  | 24 horas              | 120                          | 100                          | 75                           | 50                           | -   |
|                                |                   | Anual <sup>1</sup>    | 40                           | 35                           | 30                           | 20                           | -   |
| Material Particulado           | MP <sub>2,5</sub> | 24 horas              | 60                           | 50                           | 37                           | 25                           | -   |
|                                |                   | Anual <sup>1</sup>    | 20                           | 17                           | 15                           | 10                           | -   |
| Partículas Totais em Suspensão | PTS               | 24 horas              | -                            | -                            | -                            | 240                          | -   |
|                                |                   | Anual <sup>4</sup>    | -                            | -                            | -                            | 80                           | -   |

**Figura 2.18 – Regulamentação em vigor no Brasil para material particulado.**  
Fonte: IEMA, 2019.

Embora os problemas de saúde estejam relacionados mais especificamente para as partículas inaláveis (MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub>) e estudos comprovarem que a partícula sedimentável não causa dano físico à população exposta a esses tipos de poluente, uma vez que o mecanismo fisiológico de defesa dos humanos e animais, previne a penetração dela nos pulmões, esse mesmo particulado pode causar danos ao bem-estar social, devido a sua deposição sobre as superfícies, sendo também considerado como um dano à saúde (BASCOM et al., 1996). A Figura 2.19 ilustra esse efeito das partículas sedimentáveis, as quais são oriundas das atividades industriais, entram em suspensão no ar e viajam até as residências dos moradores, gerando grandes incômodos devido a quantidade excessiva de poeira (O GLOBO, 2016).



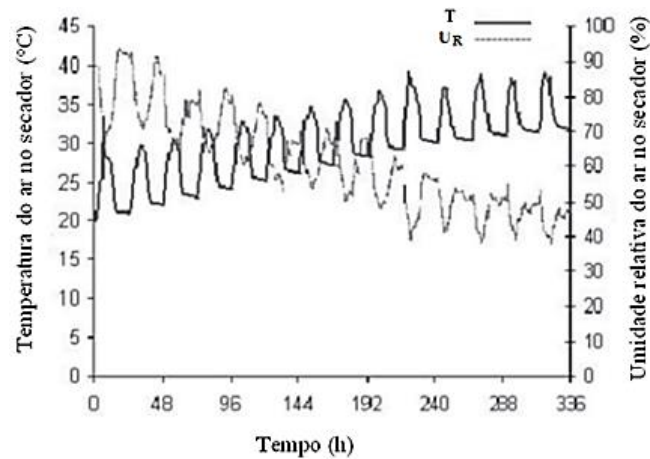
**Figura 2.19 – O pó preto da Grande Vitória.**  
Fonte: O Globo, 2016.

## **2.3. Parâmetros Associados à Geração de Poeira.**

A geração de poeira está associada a vários parâmetros, os quais destacam-se aqueles associados aos fatores meteorológicos, que podem ser agentes de amenização ou intensificação da emissão, e os fatores associados às propriedades físico-químicas de cada material, que podem ter a característica de emitir mais material particulado que outros. A seguir são apresentados os principais parâmetros associados à emissão de poeira.

### **2.3.1. Temperatura e Umidade Relativa do Ar**

A temperatura ( $T$ ) e a umidade relativa do ar ( $UR$ ) são dois fatores que estão diretamente relacionados entre si e possuem grande influência na geração de poeira. De modo geral, quanto maior a temperatura do meio, maior será a velocidade de secagem do leito, uma vez que o calor é a fonte da qual as moléculas de água adquirem a energia cinética necessária para provocar a evaporação, a qual depende tanto da quantidade de energia fornecida por unidade de tempo, como da capacidade do ar de absorver umidade. 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 vapor d'água total 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 e a diminuição a umidade relativa do ar e vice-versa, considerando que não ocorra a inserção de vapor d'água no ar atmosférico (THOMAZINI, 2015). A Figura 2.20 apresenta esse comportamento da temperatura e umidade relativa do ar no interior de um secador ao longo do tempo.



**Figura 2.20 – Comportamento da temperatura e umidade relativa do ar no interior de um secador ao longo de tempo.**

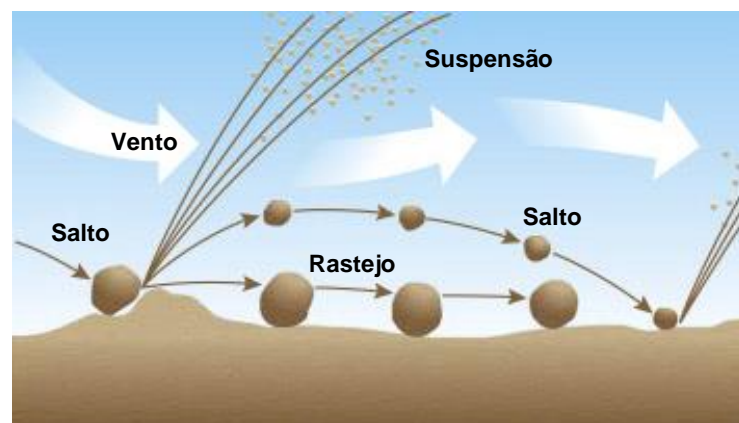
**Fonte: Bekkioui et al., 2009.**

A velocidade na qual se efetua a evaporação da água de um leito é em grande parte função da umidade relativa do ar que está em contato com a sua superfície. Se o ar tem quase tanta umidade quanto a que possa reter, este poderá absorver mais umidade, porém de forma relativamente lenta e a evaporação se realizará lentamente, porém, se ao contrário o ar tiver uma pequena porcentagem de umidade este absorverá umidade adicional mais rapidamente e a evaporação da água em tal ambiente será realizada em menor tempo (SEVERO, 1989).

### 2.3.2. Velocidade do Ar

A movimentação de minérios e a geração de poeira sofrem grande influência da velocidade do ar que passa pelas partículas durante o manuseio ou pelo leito durante o transporte. O movimento das partículas devido ao vento nas superfícies do material resulta da força de cisalhamento que o movimento de ar transmite à superfície sobre a qual se move. No transporte de minério, por exemplo, o movimento do ar em relação à superfície do material pode ter o efeito resultante do movimento dos vagões e o movimento do ar sobre o solo. O movimento combinado de trem e vento pode levar a velocidades de ar de até 100 km/h. 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 em três diferentes tipos de

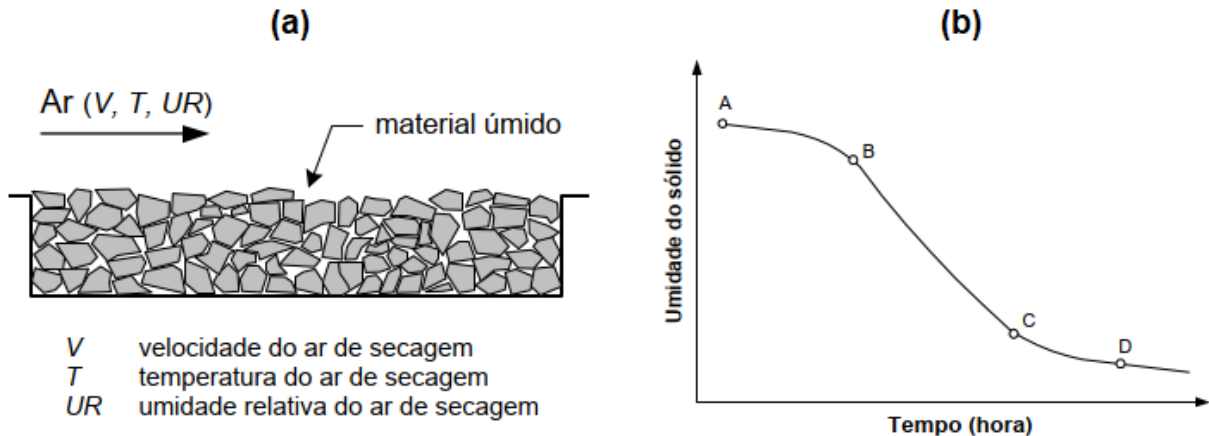
movimento de partículas: rastejo (*Creep*), salto (*Saltation*) e suspensão (*Suspension*), conforme mostrado na Figura 2.21. O movimento de rastejo refere-se ao processo em que o vento gira as partículas ao longo da superfície. No movimento de salto, as partículas podem ser retiradas por breves períodos apenas e depois retornam à superfície. Esse movimento é muitas vezes descrito como partículas "saltando" ao longo da superfície. Ao voltarem a atingir a superfície, essas partículas podem impactar e desalojar outras partículas (especialmente partículas menores) e, em alguns casos, o impacto pode quebrar partículas maiores para criar pequenas. Por último, se as partículas são suficientemente pequenas, elas podem ser totalmente arrastadas pelo vento e ficarem suspensas no ar por longas distâncias (SHAO, 2008).



**Figura 2.21 – Mecanismos de movimento de partículas devido à ação do vento.**  
**Fonte: Dustbusters Research Group, 2010.**

No caso de minérios de ferro e carvão, que são materiais transportados úmidos, a ação do vento influencia no processo de secagem do material. Segundo David (2002), em um sistema com um leito de partículas sujeito a condições constantes do ar (pressão, temperatura e umidade relativa), o sistema evolui ao longo do tempo para uma condição de equilíbrio térmico com o sólido apresentando uma umidade final, maior ou menor do que a inicial, dependendo das condições ambientes, denominada Umidade de Equilíbrio do sólido. Para que a secagem ocorra, é necessário que o meio de seca esteja a uma temperatura superior àquela do sólido úmido, permitindo que exista um fluxo de calor, o qual possibilitará a vaporização da umidade. Além disso, há casos em que o fenômeno de secagem ocorre sob condições em que o sólido úmido fica sujeito a um escoamento de ar com temperatura e umidade invariáveis com o tempo (Figura 2.22a). Nesse caso, o sólido úmido é exposto a uma

corrente de ar com temperatura,  $T$  e umidade relativa,  $UR$  que escoam em torno do sólido com uma velocidade  $V$ . O material úmido apresenta uma umidade inicial, a qual vai reduzindo com o tempo, devido a evaporação da água contida no material. Esse comportamento é ilustrado na Figura 2.22b.



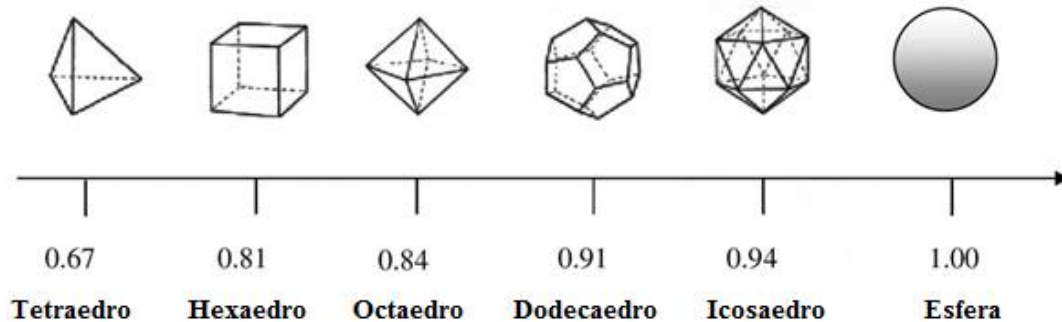
**Figura 2.22 – (a) Secagem sob condições constantes do meio de seca; (b) Redução da umidade do sólido em função do tempo.**

Fonte: (a) David, 2002; (b) Foust, 1982.

### 2.3.3. Forma da partícula

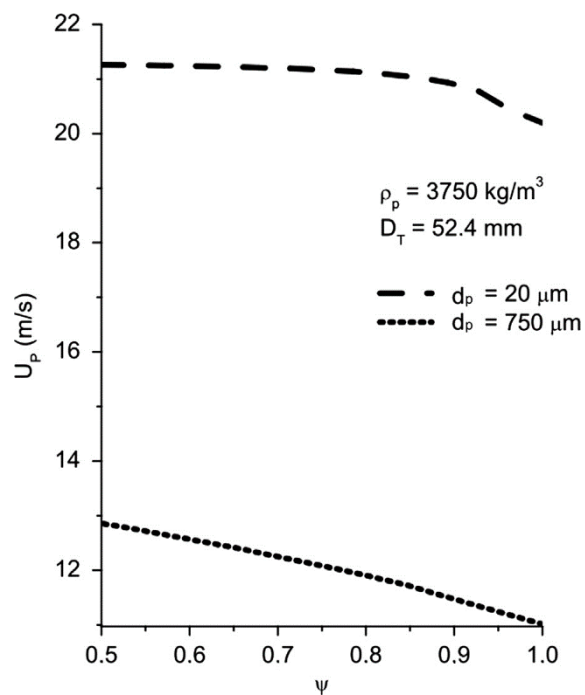
Para materiais a granel, na grande maioria, as partículas apresentam geometrias complexas, sendo muito diferentes de uma partícula esférica. Apesar disso, a maioria das abordagens utilizadas em análises de material granular utilizam partículas esféricas para facilitar a modelagem dos sistemas. A forma das partículas pode ser importante em várias situações relacionadas ao processamento de minerais porque pode afetar algumas propriedades de partículas, como área superficial, densidade aparente e coeficiente de arrasto. Descrever a forma de partículas não-esféricas não é uma tarefa simples, uma vez que a forma é uma característica tridimensional das partículas. O parâmetro mais utilizado para descrever a forma de uma partícula é a esfericidade ( $\Psi$ ), definida como a razão entre a área superficial de uma esfera de volume equivalente ao da partícula ( $S_e$ ) e a área superficial da partícula ( $S_s$ ), sendo, portanto, uma medida do quão próximo a forma de uma partícula se aproxima de uma esfera. Desta forma, para  $\Psi = 1$ , as partículas são esferas perfeitas

e, conforme o valor se aproxima de zero, menos a forma da partícula se assemelha a de uma esfera, conforme na ilustrados na Figura 2.23 (SOUZA PINTO et al., 2009).



**Figura 2.23 – Esfericidade de partículas de forma regular.**  
**Fonte: Souza Pinto et al., 2009.**

Gomes e Amarante Mesquita (2013), estudando o efeito do tamanho da partícula e sua esfericidade na velocidade de captura ( $U_p$ ), no transporte pneumático horizontal de areia seca, demonstraram que essa velocidade aumenta quando a esfericidade da partícula diminui, tanto em partículas finas ( $20 \mu\text{m}$ ) quanto em partículas grosseiras ( $750 \mu\text{m}$ ), conforme mostrado na Figura 2.24.



**Figura 2.24 – Velocidade de captura em função da esfericidade de partículas de areia.**  
**Fonte: Gomes e Amarante Mesquita, 2013.**



### 2.3.4. Tamanho da partícula

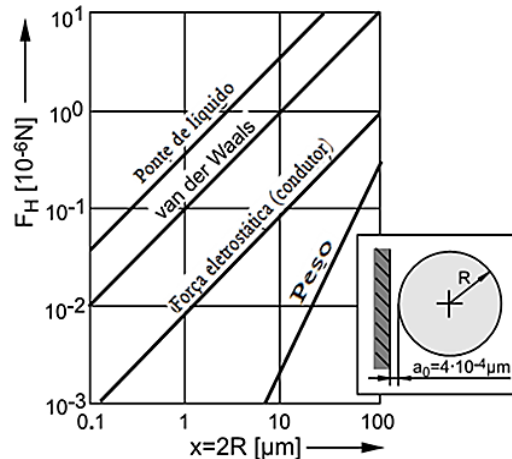
O tamanho das partículas é um dos parâmetros mais importantes no estudo da poluição atmosférica pois exerce influência sobre vários fenômenos associados aos aerossóis, tais como, a dispersão os poluentes, a deposição atmosférica e a migração através do ambiente, além de efeitos nocivos. Quanto menor o tamanho das partículas, maiores são os possíveis efeitos nocivos provocados pois podem ser inaladas e chegar inclusive, até aos alvéolos pulmonares (VÁLIO, 2015). O material particulado suspenso na atmosfera, de um modo geral, possui dimensão na faixa de 0,001  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ , 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. Esse diâmetro aerodinâmico é uma propriedade relevante, pois caracterizam o comportamento dos aerossóis suspensos na atmosfera (PEREIRA et al., 2015). A Figura 2.25 ilustra o tamanho das partículas de efeito nocivos à saúde, em relação ao fio de cabelo humano e uma partícula de areia de praia. Percebe-se, portanto, o quão pequeno são as partículas menores que 10  $\mu\text{m}$ , e o quão fácil para essas partículas entrarem em suspensão na atmosfera.



**Figura 2.25 – Relações de tamanhos de partículas.**  
**Fonte: EPA, 2017.**

Uma vez suspensas na atmosfera, as partículas podem variar de tamanho, como no caso em que gotículas de água presentes na atmosfera se aglutinam e formam particulados maiores, os quais podem vir a sedimentarem em direção ao solo

(PEREIRA et al., 2015). 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 (pontes de líquidos entre partículas). Em particulados secos, essas forças são devido a forças de van der Waals e eletrostáticas. A força de van der Waals é baseada 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, causadas pela tensão superficial do líquido e pela pressão capilar no menisco. Se essa pressão do líquido for menor que a pressão ambiente, a composição da força adesiva é intensificada. A Figura 2.26 apresenta a influência do tamanho das partículas sobre as forças de adesão ( $F_H$ ), em condições ideais (partículas esféricas de superfície lisa). Observa-se que a força eletrostática é a menor, para as partículas de menor tamanho, enquanto as forças devido às pontes de líquido são as maiores. A força de van der Waals apresenta valores intermediários entre as outras duas. Com o aumento do tamanho das partículas, todas as forças de adesão aumentam sua intensidade. No entanto, a força peso aumenta de maneira mais acentuada que as demais forças, tornando-se mais dominantes a partir do tamanho da partícula de 10  $\mu\text{m}$  (SCHULZE, 2008). Com as partículas maiores, seja pelo seu tamanho individual ou pela formação de aglomerados maiores, a força peso é predominante e importante no processo de sedimentação do material particulado em suspensão na atmosfera.

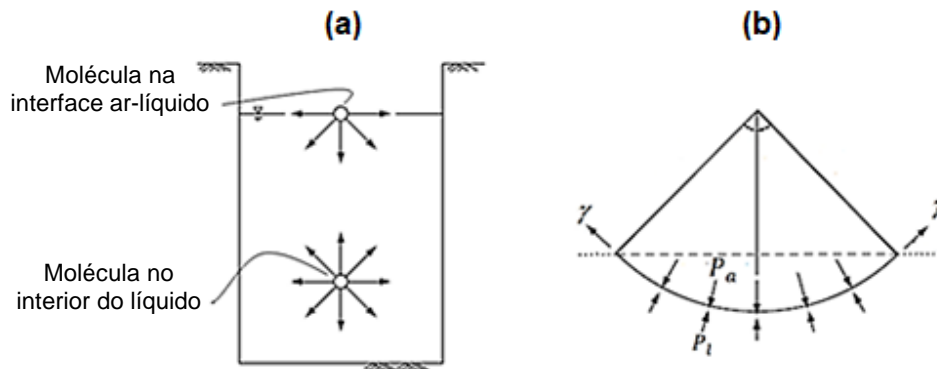


**Figura 2.26 – Forças de adesão em função do diâmetro da partícula.**  
**Fonte: Schulze, 2008.**

### 2.3.5. Tensão Superficial

As forças de adesão em materiais granulares úmidos, relacionada principalmente às pontes de líquido, presentes entre as partículas e entre partículas e parede são o efeito combinado da tensão superficial e força capilar. A ação capilar está presente em grande parte dos fenômenos que envolvam o contato de líquido e sólido, enquanto a tensão superficial ( $\gamma$ ) 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 (Figura 2.27a). As moléculas situadas no interior de um líquido são atraídas em todas as direções pelas moléculas vizinhas e, por isso, a resultante das forças que atuam sobre cada molécula é nula. As moléculas da superfície do líquido, entretanto, sofrem apenas atração lateral e inferior, dessa forma, essa superfície fica sujeita a uma determinada tensão superficial, que age de forma tangencial à interface, contraindo-a até à configuração de menor área possível. 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. A Figura 2.27b mostra a diferença entre a pressão ambiente ( $P_a$ ) e a pressão do líquido ( $P_l$ ), que ocorre na interface do menisco, onde têm-se o menisco côncavo, causado pela diferença de pressão positiva ( $P_a > P_l$ ), que está relacionada com a tensão superficial

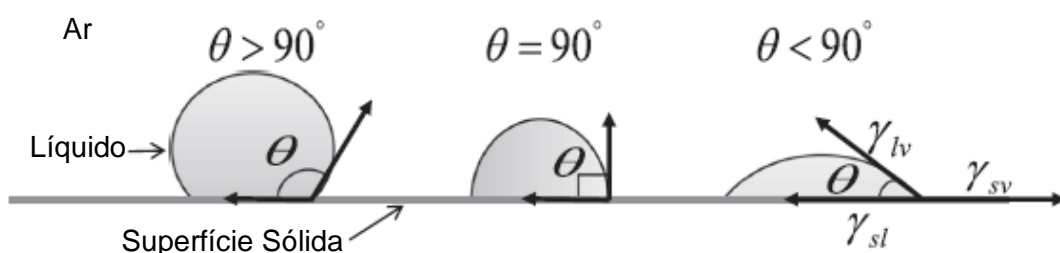
e com os efeitos da ação capilar das proximidades do ponto de contato entre as partículas esféricas.



**Figura 2.27 – a) Tensão de superfície na interface ar-líquido em um tubo capilar; b) Diferença de pressão na interface ar-líquido do menisco.**

Fonte: Fredlund e Rahardjo, 1993.

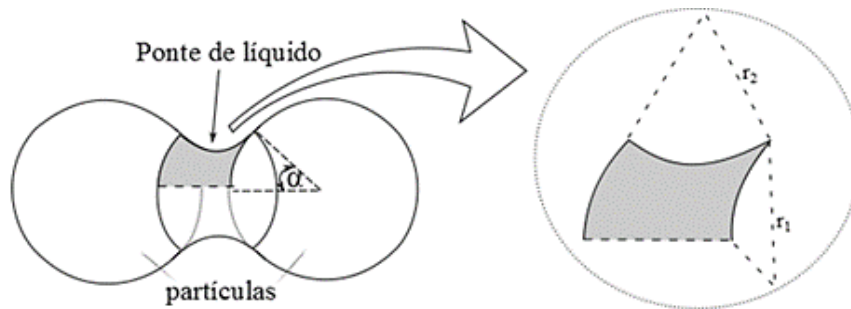
Quando uma gota de um líquido entra em contato com uma superfície de um sólido, têm-se três tipos de superfícies de interface: líquido/vapor, sólido/líquido e sólido/vapor, nas quais atuam as tensões superficiais,  $\gamma_{lv}$ ,  $\gamma_{sl}$  e  $\gamma_{sv}$ , respectivamente, que determinam o formato da gota sobre a superfície, resultando no formato final do equilíbrio de tensões entre as três superfícies de interfaces. O formato da gota depende do tipo de líquido, sendo esse formato definido pelo ângulo de contato ( $\theta$ ) entre o contorno da superfície da gota e a interface líquido/sólido, medido através da fase líquida, caracterizando a tensão existente entre sólido, líquido e gás, conforme mostrado na Figura 2.28. O ângulo de contato permite estabelecer dois tipos de comportamento distintos para a gota. Quando o ângulo de contato é inferior a  $90^\circ$ , as forças intermoleculares de adesão (entre moléculas do líquido e do sólido) são superiores às de coesão (entre moléculas do mesmo líquido). No caso em que o ângulo de contato é superior ou igual a  $90^\circ$ , a situação inverte-se (XU et al., 2018).



**Figura 2.28 – Superfícies de interface e ângulo de contato.**

Fonte: Xu et al., 2018.

A construção matemática dos efeitos capilar da ponte de líquido entre partículas considera as duas curvaturas de menisco (ar-líquido e líquido-partícula). A Figura 2.29 representa os raios da curvatura dos meniscos sobre as partículas. Considerando a região diferencial sobre as superfícies curvas da ponte de líquido, a diferença de pressão pode ser analisada pela Equação 2.1, conhecida como equação de Young-Laplace (MITARAI e NORI, 2006).



**Figura 2.29 – Ponte de líquido e os raios de curvatura de um menisco.**  
**Fonte: Mitarai e Nori, 2006.**

$$\Delta P = P_a - P_l = \gamma \left[ \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right] \quad (2.1)$$

Sendo:

$P_a$  – pressão exercida pelo ar ambiente;

$P_l$  – pressão exercida pelo líquido;

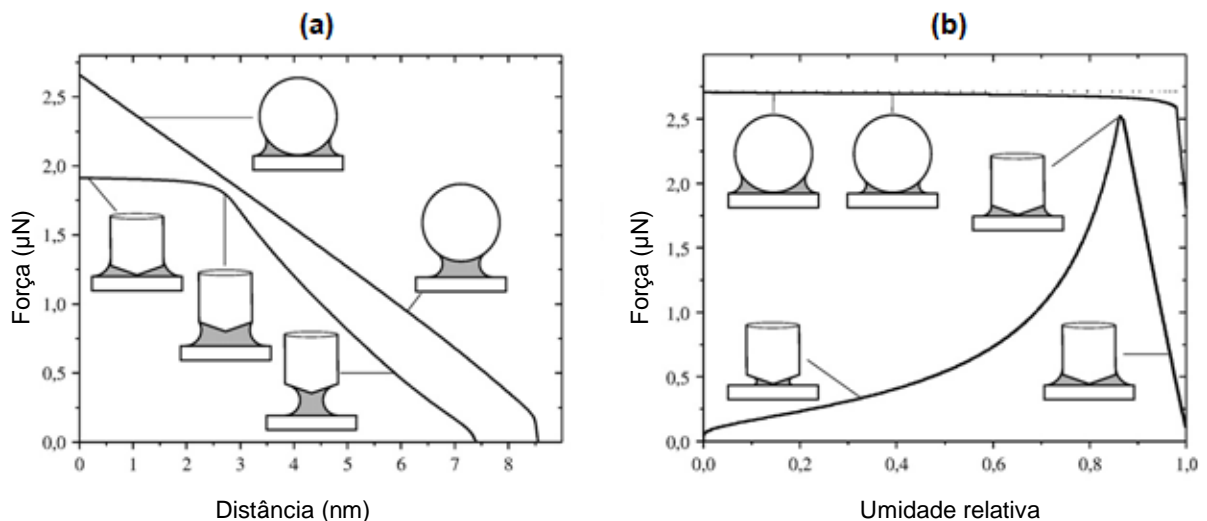
$r_1$  e  $r_2$  – raios de curvatura do menisco formado entre os pontos de contato das partículas;

$\gamma$  – tensão superficial.

Yariv e Cross (1979) definem a força capilar ( $F_c$ ) entre duas partículas esféricas de raio  $R$ , ocasionada pela existência da pressão capilar que ocorre em uma interface líquido-gás, com energia  $\gamma_{lv}$  e ângulo de contato  $\theta$ , através da Equação 2.2. Observa-se então que, quanto menor a magnitude do ângulo de contato, maior a molhabilidade do sólido pelo líquido, e que quanto maior o raio das partículas, maior a força de adesão entre elas.

$$F_c = 2\pi R\gamma \cos \theta \quad (2.2)$$

Butt e Kappl (2009) estudaram o efeito das forças capilares para geometrias complexas não-esféricas. Ao considerar outras geometrias além da esférica, a força capilar pode mudar, conforme mostrado na Figura 2.30a, a qual apresenta os resultados da força capilar para uma esfera de raio 3  $\mu\text{m}$  e cilindro de raio 200 nm (nanômetros), com uma extremidade cônica, em função da distância com uma superfície plana. Para a esfera, a força diminui linearmente com o aumento da distância até o menisco romper em 8,5 nm. Para distâncias acima de 2,7 nm, o menisco não se estende mais à circunferência completa do cilindro e a parte cônica domina. A força capilar para o cilindro decai mais acentuadamente, em relação à esfera, sendo anulada na distância de 7,4 nm. A força capilar também está relacionada com pressão de vapor, de tal forma que a própria umidade relativa do ar pode formar minúsculas pontes de líquidos em pontos de contato entre as partículas, induzindo a coesão. Tais forças dependem do grau de umidade e forma da partícula, sendo diferente para a esfera e para o cilindro com extremidade cônica, conforme mostrado na Figura 2.30b. Para a esfera, a força é quase independente da umidade do ar, exceto em umidade muito alta, onde diminui. Para o cilindro, a força capilar no contato aumenta até atingir o valor máximo, quando a umidade do ar é 0,86. Nesta parte da curva, o menisco só se estende sobre a parte cônica. Com o aumento da umidade do ar, o menisco aumenta em tamanho e, portanto, na circunferência e na área da seção transversal. Após o máximo em 0,86, a força capilar diminui abruptamente (menisco atinge a parte cilíndrica).



**Figura 2.30 – (a) Influência da geometria da partícula na força capilar; (b) Efeito da umidade relativa do ar na força capilar.**






**Fonte: Butt e Kappl, 2009.**

### 2.3.6. Umidade do Material

A adição de líquido em um material particulado é responsável pela aglomeração das partículas, em que a construção de aglomerado é feita pela ligação de cada partícula com as partículas vizinhas. Na ausência de líquido, a aglomeração vai depender somente das forças de atração que existe entre sólidos como (van der Waals; Forças eletrostáticas). A presença de líquido tem uma grande influência nas propriedades de um material granular, que pode ser observada na simples construção de castelos de areia. Pontes de líquido se formam entre as superfícies das partículas, mesmo com pequena quantidade de líquido e forças coesivas passam a existir. No entanto, se o volume de líquido aumentar, essas mesmas forças tendem a aumentar até um determinado grau de saturação (regime de polpa), onde começam a perder influência sobre o sistema, ou seja, a interação entre a fase líquida e a fase sólida em materiais granulares úmidos depende da quantidade de líquido presente no meio (PIERRAT e CARAM, 1997). Na transformação de uma mistura de material seco para uma de aglomerados (úmido), diferentes mecanismos de ligações entre partículas ocorrem. Mitarai e Nori (2006) definem quatro estágios de distribuição de água entre partículas em função do aumento do conteúdo líquido do sistema: **pendular, funicular, capilar e saturado (ou polpa)**. A Tabela 2.3 apresenta a transformação do material seco até a sua saturação, passando pelos estados onde há coesão (pendular, funicular e capilar), sendo que os círculos preenchidos representam as partículas sólidas e as regiões cinzentas representam o líquido intersticial. Em (a) tem-se o material seco, sem conteúdo de líquido. O estado pendular em (b), o qual apresenta baixos níveis de umidade, as pontes de líquido afastam as partículas, gerando uma diminuição na densidade aparente. Com o aumento de líquido, atinge-se o estado funicular em (c). 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 (d), 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 (e) 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 mistura, e o minério passa a ser uma polpa (MITARAI e NORI, 2006).

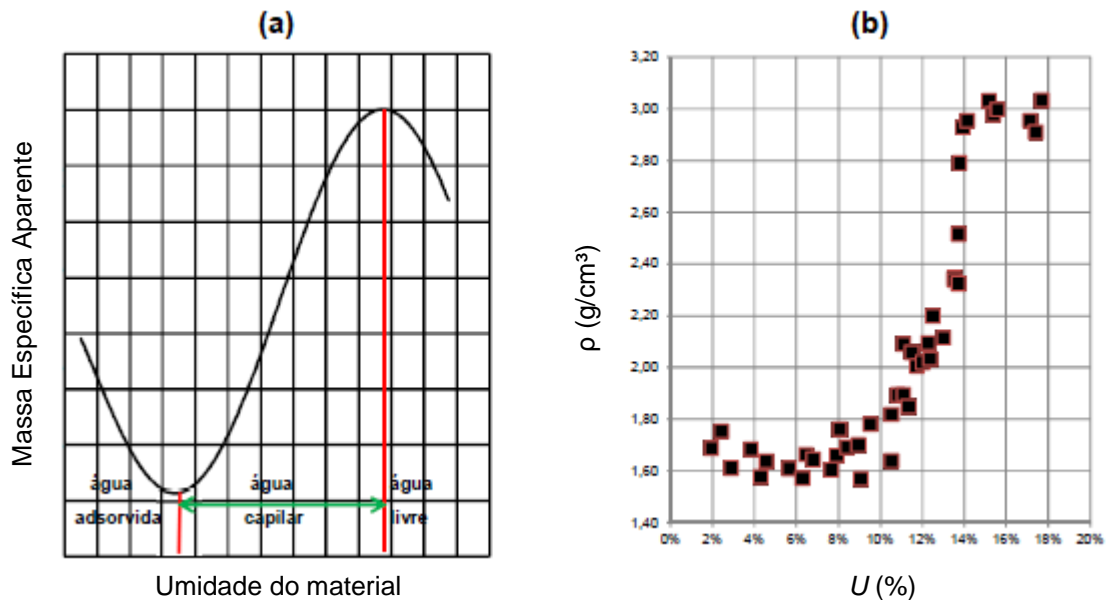
**Tabela 2.3 – Meio granular sob diferentes quantidades de líquido.**

|                      | (a)   | (b)   | (c)   | (d)   | (e)   |
|----------------------|---|---|---|---|---|
| Conteúdo Líquido     | Nulo  | Baixo   | Médio   | Alto / Quase Saturado   | Alto / Saturado   |
| Estado / Regime      | Seco  | Pendular  | Funicular   | Capilar   | Polpa   |
| Diagrama esquemático |  |  |  |  |  |

**Fonte: Mitarai e Nori, 2006.**

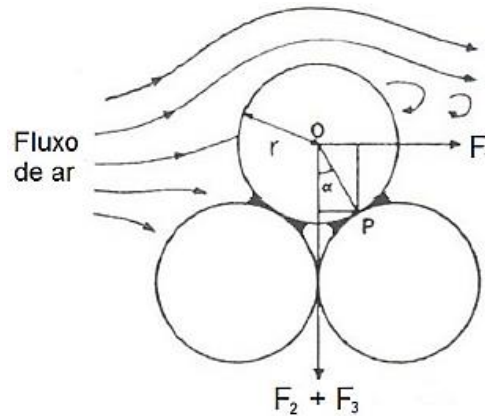
Richefeu (2005) afirma que, para solos granulares como as areias, pode existir a água adsorvida, sendo uma quantidade tão pequena de líquido que o regime higroscópico é praticamente inexistente. Utilizando este conceito, Gontijo (2017) ao conduzir experimentos de variação de umidade em minério de ferro, afirma que a distribuição de água em um leito de minério é dividida em: água adsorvida, água capilar e água livre. Segundo o autor, essa divisão existe porque tanto no estado pendular, funicular e capilar, a água está sob ação capilar nos interstícios das partículas. A mesma definição foi utilizada por Leal Filho et al. (2011), os quais investigaram a variação da massa específica aparente ( $\rho$ ) em função da umidade de minérios de ferro. Segundo os autores, por meio da determinação dos valores de mínimo e de máximo locais de cada curva é possível obter valores limites para esses três tipos de água presentes em um leito de minério, conforme ilustra a Figura 2.31a, sendo que o ponto de mínimo ocorre no início do estado pendular, do ponto de mínimo até o ponto de máximo têm-se também os estados funicular e capilar. Após o ponto de máximo, a água preenche todos os espaços entre as partículas, saturando o material no estado de água livre. A Figura 2.31b apresenta o comportamento da massa específica aparente do minério de ferro PXBR de Minas Gerais, em função da umidade. Observa-se que a água capilar está entre a umidade de 6% (mínimo) e 16% (máximo).





**Figura 2.31 – a) Comportamento da massa específica aparente de partículas em função de sua umidade; b) Resultado obtido para o minério de ferro PXBR.**  
**Fonte: Leal Filho et al., 2011.**

A influência da força peso, causada pela formação do aglomerado úmido de partículas, e força capilar são exemplificados na Figura 2.32, a qual apresenta um esquemático das forças atuantes no sistema de partículas. Verifica-se que a força cisalhante ( $F_1$ ) provocada pelo fluxo de ar sobre uma partícula presente em um leito sofre oposição do seu peso ( $F_2$ ) e da força capilar ( $F_3$ ). A força capilar ocorre devido as pontes de líquidos formadas entre as partículas. Dessa forma, se a força de adesão existente entre partículas ( $F_2 + F_3$ ) for suficiente para vencer a força de cisalhamento ( $F_1$ ) ocasionada pelo fluxo de ar, a partícula não será arrastada pelo vento. Deste modo, o peso da partícula somado à força capilar são as forças responsáveis por impedir que a partícula se desprenda do seu leito, portanto, evitando que ocorra a emissão de particulado (ALLEN, 1970). Para aumentar a força capilar, substâncias químicas capazes de aumentar a molhabilidade da partícula pela água (reduzindo o ângulo de contato da gota) podem atuar como agentes inibidores de geração de poeira. No entanto, à medida que a tensão superficial diminui com o aumento da molhabilidade, a força capilar diminui proporcionalmente. Assim, as forças que unem esses aglomerados se tornam fracas, o que significa que eles poderiam quebrar facilmente. Isso poderia potencialmente liberar as partículas no ar (ZIMON, 1969).

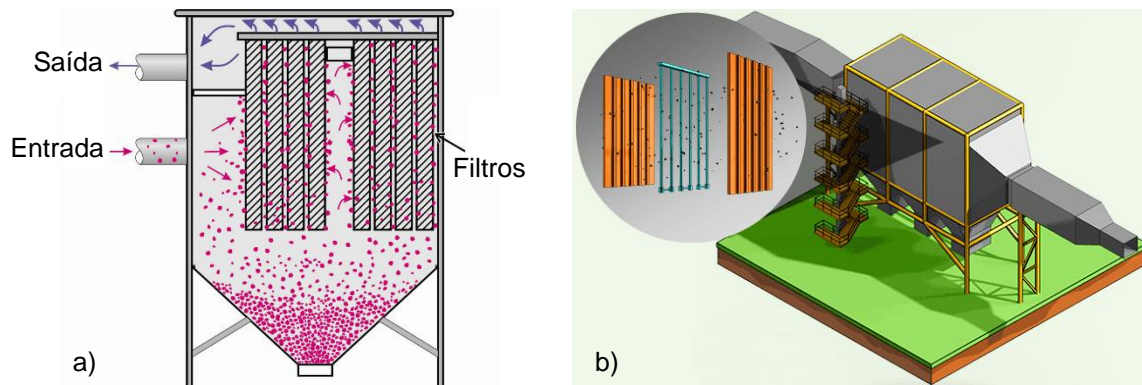


**Figura 2.32 – Esquema de forças atuantes em um leito de partículas.**  
**Fonte: Allen, 1970.**

## 2.4. Mecanismos de Controle de Emissão de Poeira

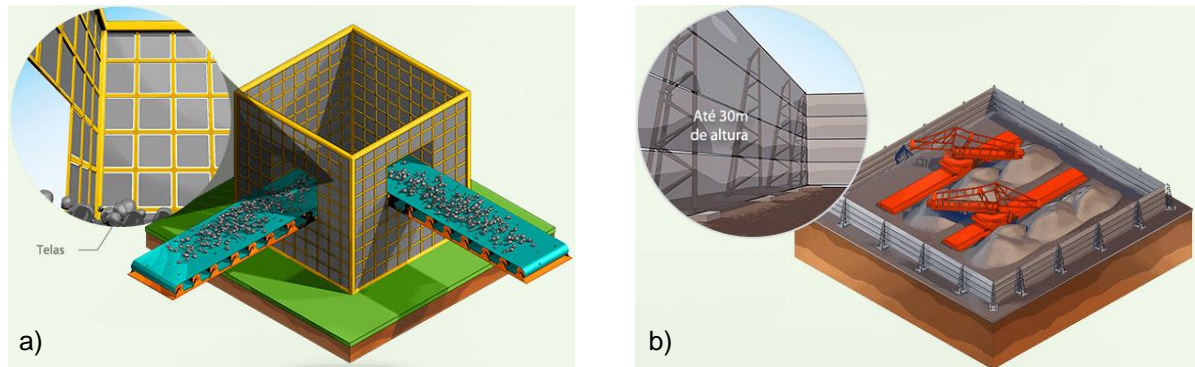
Os mecanismos de controle de material particulado são definidos conforme as características físico-químicas dos poluentes, condições climáticas do local, restrições operacionais e processo produtivo. Os principais sistemas de controle de emissões são do tipo via úmida (sistemas de aspersão de água ou supressores químicos, lavadores de gases) ou via seca (coletores, filtros de mangas, precipitadores eletrostáticos). Equipamentos do tipo via seca utilizam o princípio de ventilação para capturar a poeira da corrente de ar, afastar da fonte geradora, canalizar até equipamentos coletores (filtros) para destinação adequada, sem utilizar água. Os filtros de mangas e os precipitadores eletrostáticos são os coletores mais utilizados. Os filtros de mangas (Figura 2.33a) são os mais utilizados no controle da poluição atmosférica industrial, removendo o material particulado da corrente de ar contaminada, passando-a por tecidos porosos (mangas), que compõem esse tipo de filtro. As mangas podem ser definidas como bolsas, normalmente de formato cilíndrico, cujo tecido é usado para retenção das partículas, quando a corrente de ar carregado de partículas passa pelos seus poros. Os precipitadores eletrostáticos (Figura 2.33b) removem material particulado de uma corrente gasosa através da criação de alto diferencial de voltagem entre eletrodos. Quando a corrente de ar carregado com as partículas passa entre os eletrodos, as moléculas gasosas ficam ionizadas, resultando em cargas nas partículas, as quais, uma vez carregadas, são

atraídas para o prato de carga oposta e removidas enquanto a corrente gasosa prossegue (CECALA et al., 2012).



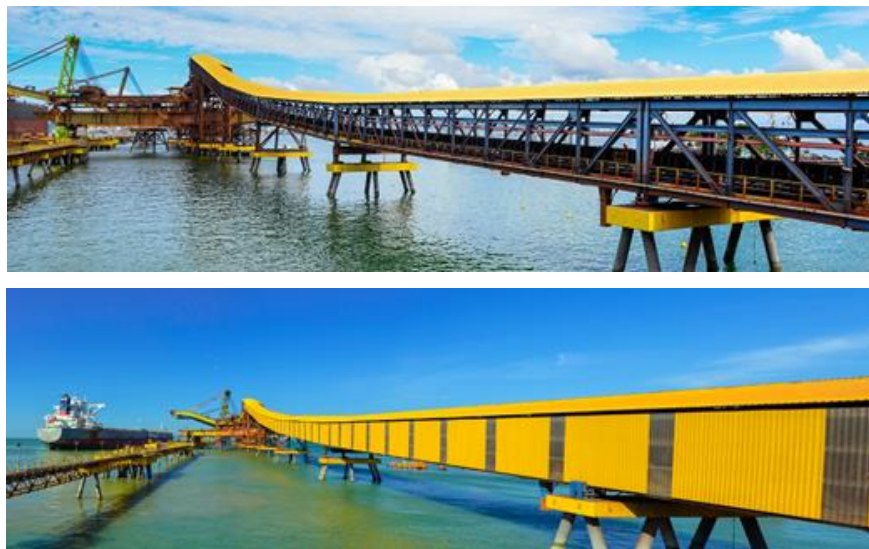
**Figura 2.33 – a) Filtro de mangas; b) Precipitador eletrostático.**  
**Fonte: a) Cecala et al., 2012; b) Vale, 2017d.**

Para as emissões de fontes difusas, que em geral ocorrem em locais de grande extensão (pátios de estocagem, correias transportadoras), as partículas fugitivas de poeira surgem quando uma corrente de ar passa através do material ou quando há mudança de direção no manuseio do material (chutes de transferências). Nesses casos, dois mecanismos são amplamente utilizados: barreiras físicas contra a ação do vento e a supressão de poeira via aspensão de água ou com a adição de supressores químicos. A instalação de barreiras de vento é feita para reduzir a ação de incidência do vento sobre o material estocado ou manuseado. A Figura 2.34a ilustra o enclausuramento de casas de transferências de transportadores de correias com telas e estruturas metálicas que reduzem o arraste da poeira pelo vento, durante o manuseio do minério. Em pátios de estocagem, que ficam a céu aberto e possuem grandes dimensões, barreiras de vento (*wind fences*) podem ser utilizadas para cercar os pátios de estocagem de produtos (Figura 2.34b), reduzindo a velocidade dos ventos e, conseqüentemente, reduzindo o arraste de poeira (Vale, 2017d).



**Figura 2.34 – a) Enclausuramento das casas de transferências e b) *Wind fences*.  
Fonte: Vale, 2017d.**

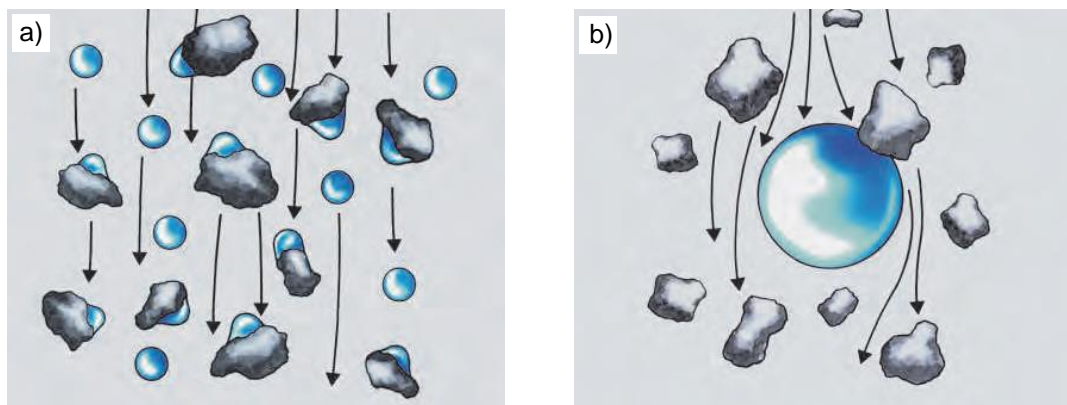
Nos píeres onde ocorre o carregamento e descarregamento de navios, há grande incidência de ventos com alta velocidade devido a posição próxima ao mar. Dessa forma, o arraste de material é mais acentuado. Para minimizar esse efeito, a utilização de enclausuramento dos transportadores de correias também são utilizados, como feito no píer de carregamento de navios do Porto de Tubarão/ES (Figura 2.35). Ao todo foram 6 mil m<sup>2</sup> de enclausuramento em toda extensão dos transportadores, com aproximadamente 500 metros de extensão. (CONEXÃO MINERAL, 2017).



**Figura 2.35 – Enclausuramento de transportador de correia.  
Fonte: Conexão Mineral, 2017.**

Os sistemas de aspersores de água (sprays) continuam sendo o meio mais utilizado e econômico de controlar a emissão e dispersão de material particulado em processos industriais, quando aplicáveis. A aspersão por sprays atua em duas vertentes: prevenção e supressão de poeira. Na prevenção, o material é umidificado,

agregando as partículas menores, aumentando seu peso específico e impedindo que sejam transportadas pelo ar. Na supressão, as gotas aplicadas pelo spray devem possuir tamanho equivalente às partículas em suspensão no ar (Figura 2.36a), para que as partículas de pó sejam completamente englobadas pela água, aumentando a eficiência de captura, fazendo com que as partículas de pó se aglomerem e sedimentem, impedindo que elas se dispersem no ar (MOHAL, 1988). A captura de poeira envolve quatro etapas: (1) colisão entre partículas de poeira e gotículas de água, (2) adesão de partículas a gotículas, (3) absorção de partículas pelas gotículas e (4) aglomeração de partículas molhadas (TIEN e KIM, 1997). Para que a aspersão seja eficaz na redução de particulados finos em suspensão no ar, seu efeito deve ser de aumentar o peso das partículas. Isso pode ser conseguido de duas maneiras: Primeiro, as próprias gotículas cobrem as partículas de material particulado, molhando-as e aumentando seu peso. Este aumento de peso significa que eles serão menos propensos a ficarem suspensos no ar. Em segundo lugar, as partículas aglomeram-se através das forças de adesão capilar, e os aglomerados retêm as partículas finas, impedindo-as de serem arrastadas pelo ar (KILAU, 1993). Gotas maiores de água têm uma velocidade no ar muito maior e uma tensão superficial mais alta, ou seja, dificilmente conseguem se combinar com as finas partículas de poeira e reagir com elas (Figura 2.36b).



**Figura 2.36 – Influência tamanho de gotículas de água na supressão de poeira.**  
**Fonte: RWE Technology International, 2019.**

Os sprays de água são utilizados em diversas aplicações, tais como: operações de recuperação de pilhas de material (Figura 2.37a), virador de vagões (Figura 2.37b), pátios de estocagem (Figura 2.37c), superfícies de material em vagões (Figura 2.37d).





**Figura 2.37 – Sistemas de aspersão de água.**

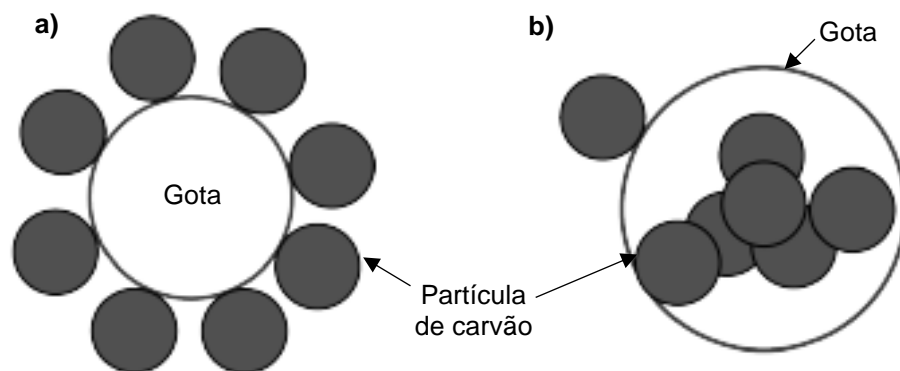
**Fonte:** a) Fluidjet, 2018; b) IEMA, 2014; c) Regattieri, 2010; d) Peter e Wypych, 2018.

Apesar da comprovada eficiência do uso da água como supressor de poeira, as condições climáticas provocam a secagem do material (redução de umidade), ao longo do tempo de exposição. Dessa forma, para minimizar o consumo de água e aumentar a eficiência na supressão de poeira, produtos químicos, como polímeros são dissolvidos em água para serem utilizados como supressores. Segundo Regattieri (2010), o uso de supressores químicos, em soluções aquosas, aplicado através de aspersores localizados em diversos pontos da área de movimentação dos minérios, é um mecanismo viável para a redução das emissões atmosféricas, uma vez que evitam a emissão de material particulado para a atmosfera. Para pilhas de estocagem e leitos de minério em vagões, esses supressores químicos agem formando uma película de proteção contra a ação do vento, a qual impede que partículas finas se desprendam do leito do material e sofram dispersão pelo ar, reduzindo a propagação de poeira no ambiente. A Figura 2.38 apresenta os dois cenários mais comuns onde são aplicados supressores químicos de particulado.



**Figura 2.38 – Aplicação de supressor químico em: a) vagões e b) pilhas de estocagem.**  
**Fonte: a) Asperminas, 2017; b) Vale, 2018b.**

Outra importante limitação do uso da água na supressão de pó está relacionada à característica de hidrofóbicas de alguns materiais, como é o caso do carvão, uma vez que as suas partículas possuem baixa molhabilidade com a água e, conseqüentemente, a pulverização de água não será eficaz na captura de partículas finas (MOHAL, 1988). Conforme mostrado na Figura 2.39, se a tensão superficial é baixa, a partícula tende a ser mais molhada porque precisa apenas de uma quantidade mínima de energia cinética para penetrar na gotícula de água, através da queda da tensão superficial. Entretanto, se a tensão superficial é alta, as partículas precisam gastar sua energia cinética para penetrar em uma gota, e portanto, as partículas só aderem à superfície das gotas. Agentes químicos, como surfactantes, são usados para superar essa dificuldade. Os surfactantes são conhecidos por reduzir a tensão superficial da água e, portanto, podem permitir que a partícula penetre em uma gota mais facilmente (CHANDER et al., 1988).

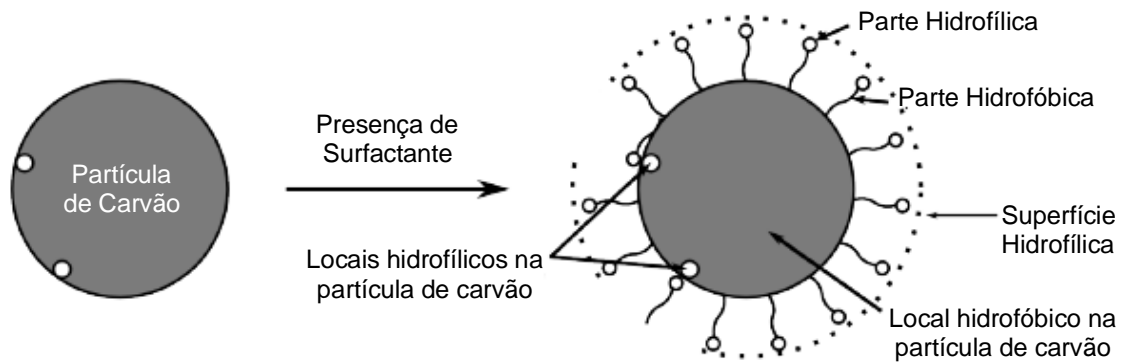


**Figura 2.39 – Capacidade uma gota na coleta de partículas de carvão com (a) alta tensão interfacial e com (b) baixa tensão interfacial.**  
**Fonte: Chander et al., 1988.**

O surfactante é uma classe de produto químico que, em solução, a concentração é maior na superfície do líquido, ou seja, o surfactante se concentra na superfície onde ele precisa funcionar. Este fenômeno é conhecido como adsorção e ocorre nas interfaces líquido-sólido, líquido-líquido e líquido-ar (PORTER, 1994). Como o surfactante tem a capacidade de modificar propriedades interfaciais em baixas concentrações, é amplamente utilizado em inúmeras aplicações, como as indústrias mineral, ambiental, agrícola, farmacêutica, entre outras. Os surfactantes são compostos orgânicos e suas moléculas consistem em grupos de cabeças polares (hidrofílicos) e grupos de cauda não-polares (hidrofóbicos). Os grupos de cabeças hidrofílicas tornam os surfactantes solúveis em solventes polares, como a água, e esses grupos determinam as principais características dos surfactantes. Os grupos de cauda hidrofóbica são geralmente constituídos por cadeias de hidrocarbonetos, que tornam o surfactante insolúvel em solvente polar (ROSEN e KUNJAPPU, 2012). Na indústria mineral, pode ser usado para aumentar a eficiência de supressão de poeira quando adicionado ao sistema de pulverização de água, melhorando a sua molhabilidade e reduzindo o tamanho da gotícula. Os tipos de surfactantes aplicados à supressão de particulado de carvão, por exemplo, são geralmente constituídos por grupos de cabeças hidrofílicas e grupos de cauda hidrofóbica. Após a adição de surfactantes na água, os fenômenos de adsorção ocorrem na interface entre a solução de surfactante e a superfície do carvão, quando os grupos de cabeças hidrofílicas de surfactantes estão em um ambiente polar, e as caudas hidrofóbicas dos surfactantes tendem para a superfície do carvão hidrofóbico. Os grupos de cauda hidrofóbica ligam-se aos sítios hidrofóbicos na superfície do carvão através de forças de dipolo, deixando as cabeças hidrofílicas orientadas para a fase de água circundante, conforme mostrado na Figura 2.40. Este processo converte os locais hidrofóbicos na superfície do carvão em locais hidrofílicos, o que melhora o desempenho de umectação de carvão (TIEN e KIM, 1997).

A escolha adequada de cada tipo de controle de emissão de poeira depende de uma série de fatores tais como as condições ambientais climáticas, propriedade do material particulado manuseado e equipamentos em operação. Da mesma forma, a utilização de agentes químicos tais como surfactantes e polímeros, deve ser investigada de acordo com a sua aplicação.



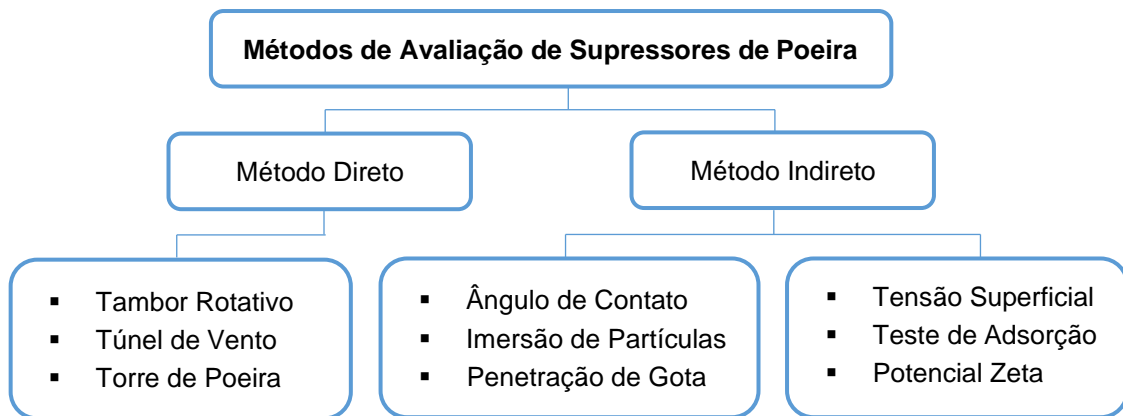


**Figura 2.40 – A formação de superfície hidrofílica em partículas de carvão.**  
**Fonte: Tessum, 2015.**

## 2.5. Técnicas de Avaliação de Emissão e Supressão de Poeira

O teste em campo é o método mais direto de avaliar a emissão e supressão de poeira em diversos processos, uma vez que é conduzido sob as condições reais de trabalho onde emissão do material particulado ocorre. No entanto, além do elevado custo e tempo consumido, necessários para essa avaliação, o teste em campo é difícil de ser realizado devido aos múltiplos fenômenos de interação e grande flutuação das condições operacionais e climáticas, tornando esse método difícil para se obter resultados confiáveis e abrangentes. Diante disso, testes em laboratório são largamente utilizados pois são capazes de realizar testes com condições controladas e com reprodutibilidade dos resultados. Xu et al. (2018) categorizaram as técnicas mais utilizadas para avaliar a eficiência de supressores de poeira em dois grupos: métodos diretos e métodos indiretos. Métodos indiretos avaliam as interações entre as partículas do material com o agente supressor, quando ambos estão em contato por um determinado período, enquanto os métodos diretos tentam reproduzir a interação dinâmica entre o agente supressor e as partículas de material particulado. Conforme apresentado na Figura 2.41, entre os métodos indireto, o teste de tensão superficial, o teste de adsorção e o teste do potencial zeta são geralmente utilizados para descrever a adsorção do supressor, enquanto que os testes de imersão de partículas, medição de ângulo de contato e o teste de penetração de gota são comumente empregados para expressar as características de molhabilidade. Entre os métodos diretos encontram-se os testes em túnel do vento, tambor rotativo e torre de

poeira. A grande maioria dos estudos são baseados em testes indiretos, devido à facilidade de operação e conveniência no controle das variáveis. No entanto, eles não refletem diretamente a eficácia da supressão de poeira, pois os materiais não estão submetidos à cenários similares aos dos processos produtivos, por isso a necessidade de testes utilizando os métodos diretos.

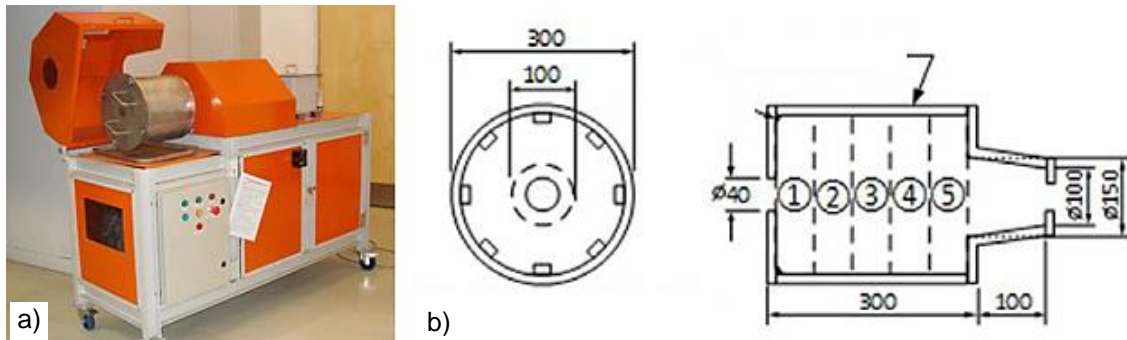


**Figura 2.41 – Métodos de avaliação de supressores.**  
**Fonte: Xu et al., 2018 (Adaptado).**

### 2.5.1. Tambor Rotativo

A norma australiana AS4156.6 "Determinação da relação de poeira/umidade para o carvão", é um padrão usado para medir a umidade de extinção de poeira (*Dust Extinction Moisture* - DEM) para uma variedade de materiais a granel e não apenas de carvão, como foi projetado originalmente. O aparato de ensaios da norma australiana (Figura 2.42) consiste em um tambor cilíndrico com 300 mm de diâmetro interno e 300 mm de comprimento. A parte frontal do tambor é fechada com uma tampa com um furo central para abertura de ar de 40 mm de diâmetro, podendo ser de material transparente para fins de visualização, com sua parte de trás é afunilada. O teste é realizado adicionando 1 kg de material a granel, passante de 6,3 mm a uma umidade definida, ao tambor do equipamento de testes. O tambor então rotaciona a 29 rpm por um período de 10 minutos. Durante este tempo, um fluxo de ar de 175 litros/min é extraído através do tambor e o pó é coletado em um filtro, o qual é pesado ao final do teste. Este procedimento é repetido com novas amostras não ensaiadas, variando os valores de umidade. Todos os testes são realizados em ambiente com

temperatura e umidade relativa do ar controlados, conforme especificação da norma, respectivamente em 20°C e 63% (FREW et al., 2013).

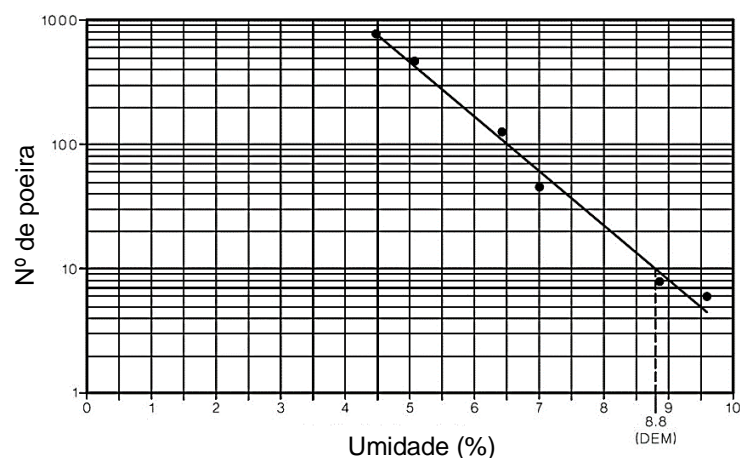


**Figura 2.42 – (a) Aparato de testes da norma Australiana AS4156.6; (b) desenho esquemático do tambor de ensaio.**

**Fonte: Wangchai et al., 2016.**

Uma vez completada uma série de testes, a Equação 2.3 é usada para determinar o número de poeira. Os resultados são plotados em um gráfico log/linear como mostrado na Figura 2.43, onde DEM é definido como a umidade em que o número de poeira é 10.

$$N^{\circ} \text{ de Poeira} = \frac{\text{Massa de Poeira (g)}}{\text{Massa Total da Amostra (g)}} \times 10^5 \quad (2.3)$$

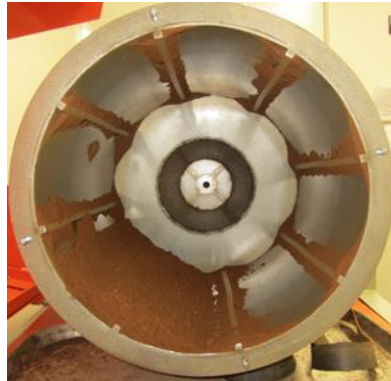


**Figura 2.43 – Curva de poeira/umidade, mostrando o DEM = 8,8%.**

**Fonte: Frew et al., 2013**

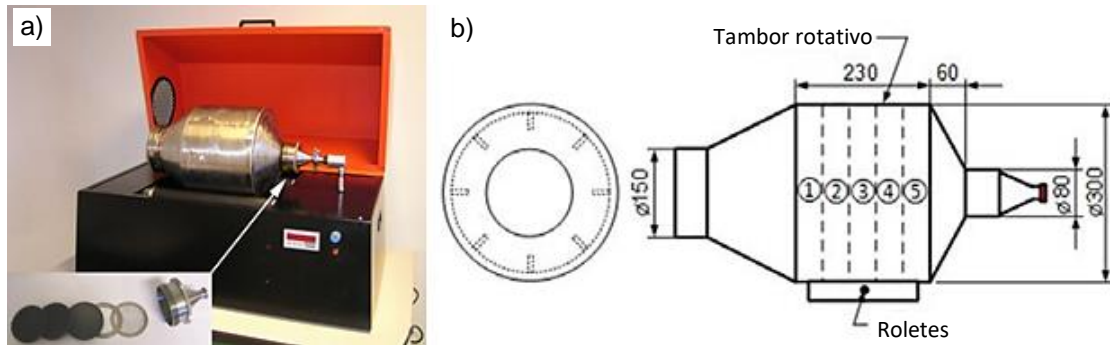
Segundo Frew et al. (2013), algumas outras questões foram identificadas como possíveis limitações e/ou fontes de erro do teste em tambor rotativo da norma

AS4156.6. Um desses problemas potencialmente significativos é a adesão do produto ensaiado no interior do tambor rotativo (Figura 2.44), em umidades que se aproximam do DEM. Espera-se que essa adesão tenha um efeito apreciável nos resultados.



**Figura 2.44 – Teste de poeira no minério em 8.1% de umidade (DEM = 11%).  
Fonte: Frew et al., 2013.**

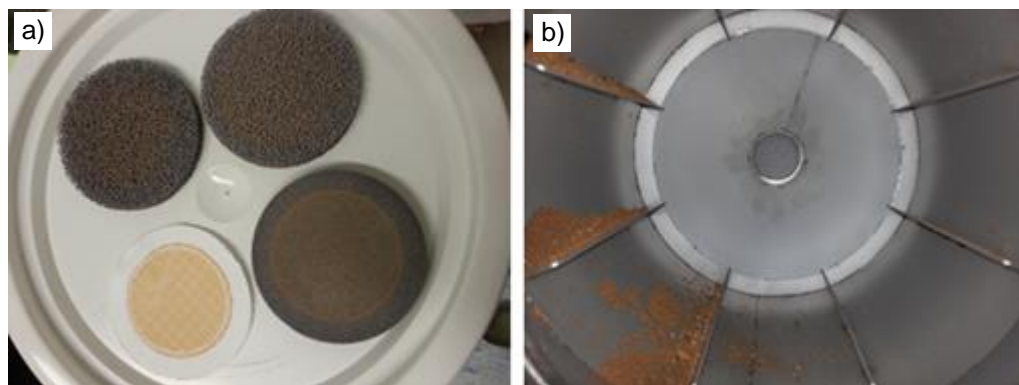
Usando o mesmo princípio do tambor rotativo, a norma europeia EN15051 concentra-se na medição e classificação da poeira de uma determinada amostra para emissões no local de trabalho, com base nas frações de massa de poeira inaláveis, torácicas e respiráveis. Se a fração de massa de poeira inalável for menor que 5000 mg por quilograma da amostra ensaiada, então a dispersão da amostra de pó é classificada como alta. Embora não seja descrito na norma, também é possível determinar a relação número de poeira/umidade para um material particulado, simplesmente repetindo o ensaio para diferentes valores de umidade, similar aos procedimentos utilizados na norma australiana (WANGCHAI et al., 2016). O aparato de testes da norma EN15051, possui um tambor rotativo com 300 mm de diâmetro interno e 230 mm de comprimento, sendo que ambas as extremidades são afuniladas. Quatro filtros porosos estão instalados na extremidade do tambor como mostrado na Figura 2.45a. A maior extremidade é para a entrada de ar no interior do tambor e possui 150 mm de diâmetro (Figura 2.45b). No ensaio são utilizados 35 cm<sup>3</sup> de um tamanho de partícula não especificado do material carregado no tambor da máquina. O tambor é então rotacionado a 4 RPM durante 1 minuto com um fluxo de ar de 38 litros/min fluindo através do tambor.



**Figura 2.45 – a) Aparato de testes da norma europeia EN15051 e b) desenho esquemático do tambor de ensaio.**

**Fonte: Wangchai et al., 2016**

Os quatro filtros consistem em duas espumas de 20 ppi (pixels per inch ou pixels por polegada) para a fração inalável e uma espuma de 80 ppi para a fração torácica e um filtro de reserva para a fração respirável. A Figura 2.46a mostra os 4 filtros usados para coleta de poeira e a Figura 2.46b mostra uma imagem interna do tambor após um teste com minério de ouro.



**Figura 2.46 – a) Filtros e b) interior do tambor da EN 15051, após um teste completo com de minério de ouro a 0% de umidade.**

**Fonte: Frew et al., 2013.**

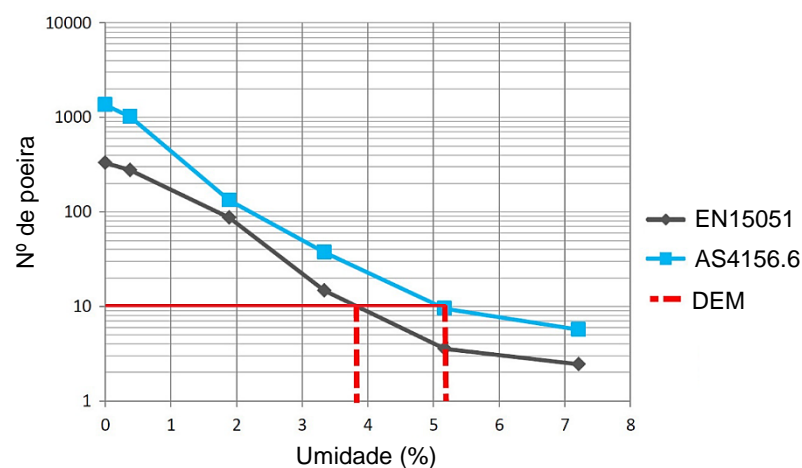
Embora seja utilizado um aparato semelhante aquele usado no AS 4156.1, o método de teste da norma EN15051 é muito diferente. A Tabela 2.4 abaixo apresenta algumas das diferenças entre as duas máquinas.

**Tabela 2.4 – Comparação entre os testes em tambores rotativos.**

| Parâmetro                             | AS4156.6                                     | EN15051            |
|---------------------------------------|--|--------------------|
| Quantidade de material                | 1 kg (carvão) ou volume equivalente em massa | 35 cm <sup>3</sup> |
| Máximo tamanho de partícula           | 6,3 mm                                       | Não especificado   |
| Condições ambiente                    | 20 °C, 63% UR                                | 21 °C, 50% UR      |
| Diâmetro do tambor                    | 300 mm                                       | 300 mm             |
| Palhetas no tambor                    | 8: 7 mm (largura) x 6 mm (altura)            | 8: 25 mm de altura |
| Rotação do tambor                     | 29 RPM                                       | 4 RPM              |
| Duração do Teste                      | 10 min                                       | 1 min              |
| Diâmetro de sucção de ar              | 40 mm  | 150 mm             |
| Fluxo de ar de sucção                 | 170 litros/min                               | 38 litros/min      |
| Velocidade do ar da entrada do tambor | 2,25 m/s                                     | 0,036 m/s          |
| Velocidade do ar dentro do tambor     | 0,04 m/s                                     | 0,009 m/s          |

**Fonte: Frew et al., 2013 (Adaptado).**

Frew et al. (2013) realizaram experimentos com minério de ferro para investigar possíveis diferenças nos resultados entre as duas normas. A Figura 2.47 apresenta os resultados típicos obtidos no minério de ferro. A diferença resultante no DEM (DEM = 5,2% para AS4156.6 e 3,8% para EN15051) indica uma diferença significativa na umidade que seria necessária para o controle de poeira.



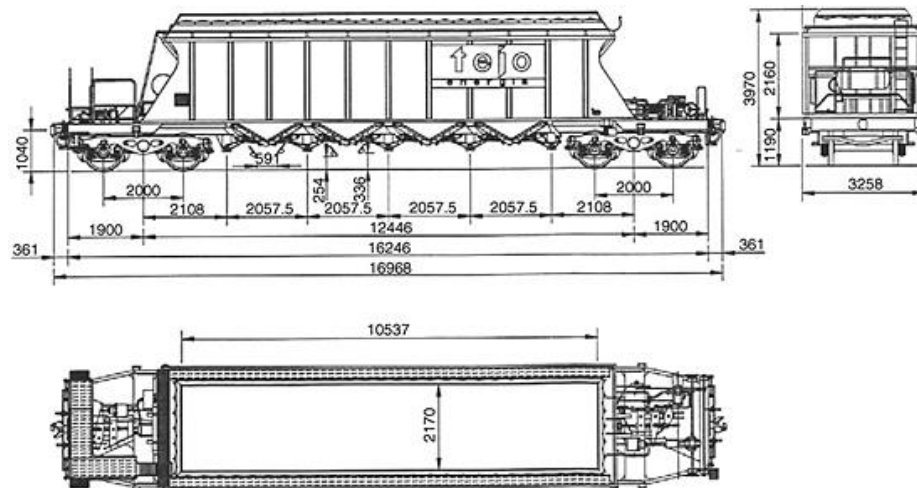
**Figura 2.47 – Comparação entre os testes AS4156.6 e EN15051.**

**Fonte: Frew et al., 2013.**

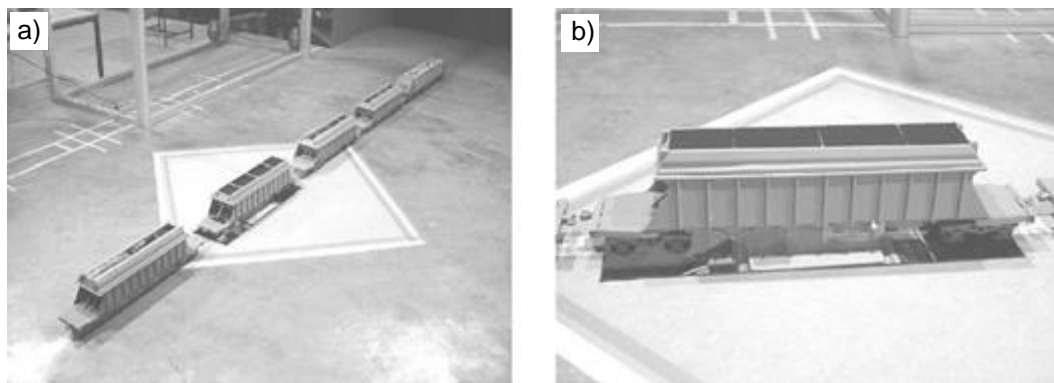
### 2.5.2. Túnel de Vento

Outro método direto de avaliar a emissão de particulados de leitos de materiais a granel é através da utilização de túneis de vento. A determinação da velocidade de arraste ou captura da partícula, a qual entra em suspensão no ar, e pode ser transportada por longas distâncias, é um importante parâmetro que pode ser determinado nesse tipo de teste. Esse particulado é, geralmente, conhecido pelo termo “pó fugitivo”, uma vez que o particulado não emana de um ponto confinado, mas sim de uma área aberta, como são os casos de pilhas em pátios de estocagem e superfície de material em um vagão ferroviário. No entanto, medir essa velocidade de captura das partículas pelo ar em grandes pilhas ou em vagões de trem que viajam longas distâncias se torna inviável. Dessa forma, ensaios em túnel de vento com modelo em escala tem se mostrado uma eficiente ferramenta de estudo do mecanismo de emissão de particulados (DJUKIC e PLANNER, 2010).

Ferreira e Vaz (2004) realizaram estudos, em túnel de vento com modelos em escala, dedicados ao problema de emissões de poeira fugitivas de carvão durante o processo de transporte de longa distância usando vagões de trem. O túnel de vento utilizado para este estudo é instalado no Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI), que faz parte das instalações da Universidade de Coimbra, Portugal, o qual possui seção de teste aberta de 5 m de comprimento e 2 m de largura. Os testes foram conduzidos com velocidade de 13,4 m/s, uma vez que testes realizados a velocidades inferiores (10,1 m/s) não mostraram erosão das partículas de carvão usadas nos experimentos, revelando que uma maior velocidade do vento seria necessária para causar perda de material (FERREIRA e VAZ, 2004). A Figura 2.48 mostra um desenho esquemático de um vagão típico de transporte de carvão, que tem dimensões aproximadas de 17 m de comprimento, 3,3 m de largura e 4 m de altura. Para os testes experimentais, Ferreira e Vaz (2004) utilizaram um modelo de escala 1:25, reproduzindo com grande detalhe uma locomotiva e quatro vagões (Figura 2.49). O comprimento máximo da composição quando a locomotiva e os quatro modelos de carros são colocadas na seção de trabalho do túnel de vento é de 3,55 m.



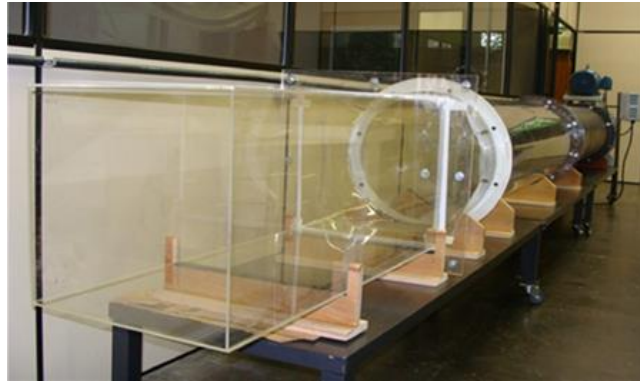
**Figura 2.48 – Dimensões em escala real dos vagões modelados (dimensões em mm).  
Fonte: Ferreira e Vaz, 2004.**



**Figura 2.49 – Modelo da composição ferroviária máxima e b) detalhe do vagão.  
Fonte: Ferreira e Vaz, 2004.**

Leal Filho et al. (2011), no intuito de avaliar a geração de poeira durante o transporte ferroviário dos concentrados de minério de ferro a partir de Minas Gerais até o porto de Tubarão (ES), utilizaram um túnel de 6 m de comprimento e seção de testes de 0,5 m de diâmetro (Figura 2.50). O túnel possui um ventilador axial, o qual é acionado por um motor de 10 HP, capaz de produzir fluxos de ar com velocidades que variam na faixa de 11 a 28 m/s, medida através de dois tubos Pitot posicionados paralelamente e ortogonalmente ao fluxo de ar. Medidores de temperatura e umidade relativa do ar foram devidamente instalados, permitindo monitorar as condições ambientais de cada teste.





**Figura 2.50 – Túnel de vento utilizado.**  
**Fonte: Leal Filho et al., 2011.**

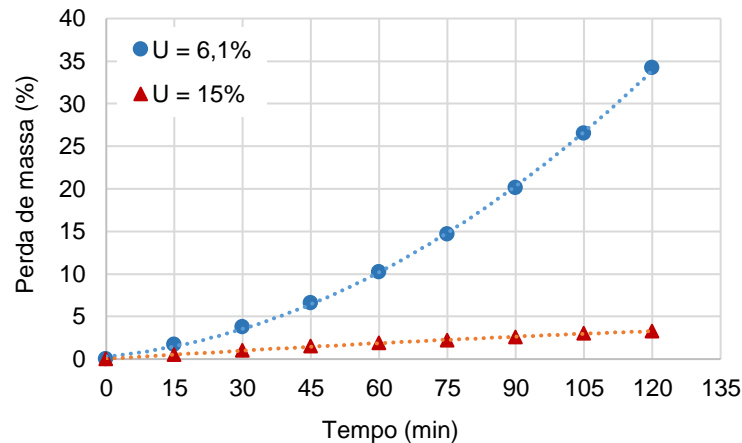
Um modelo de vagão (Figura 2.51), construído na escala de 1:25 de um vagão de trem comumente utilizado no transporte de minérios na EFVM, é posicionado na seção de teste do túnel de vento. Para economizar massa de amostra e poder realizar maior número de testes, foi introduzido um fundo falso no modelo de vagão, que foi posicionado a 60% de sua altura. A massa de minério de ferro no modelo é de aproximadamente 3,0 kg.



**Figura 2.51 – Modelo de vagão, em escala 1:25, carregado de minério de ferro.**  
**Fonte: Leal Filho et al., 2011.**

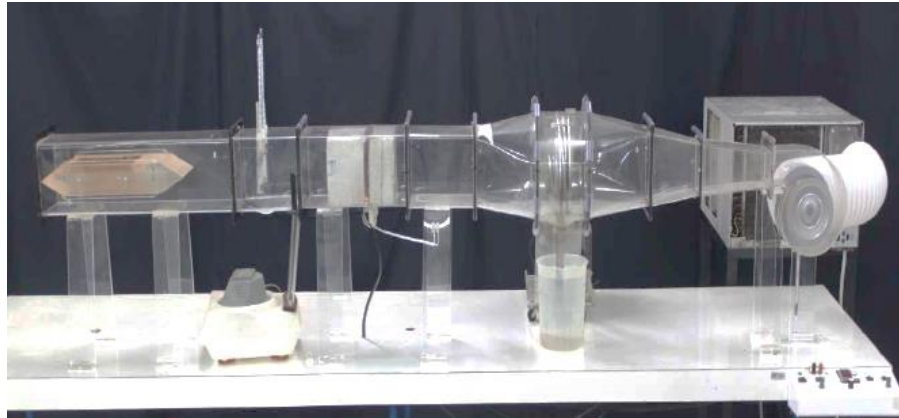
Nesse trabalho, Leal Filho et al. (2011) avaliaram o efeito de agentes inibidores de geração de poeira (água e agentes químicos) em função da perda de massa de material ao longo do ensaio, sob diferentes valores de umidade do minério. A perda de massa, devido ao arrasto provocado pelo fluxo de ar a 60 km/h de velocidade aplicado sobre o modelo carregado de minério, foi monitorada em intervalos de 15 minutos. Os resultados obtidos mostram que, após um intervalo de tempo de 120 minutos de ensaio, a amostra com umidade inicial de 6,1% perdeu 34,2% da massa, enquanto a amostra com teor de umidade inicial de 15% perdeu 3,3% da massa, conforme mostrado na Figura 2.52. Portanto, os resultados

mostraram que o aumento da umidade do material tem eficiência na redução da emissão de particulados durante o transporte ferroviário.

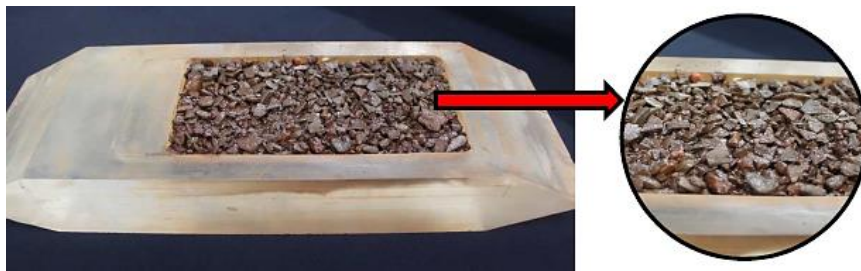


**Figura 2.52 – Perda de massa para o concentrado de Brucutu.**  
**Fonte: Leal Filho et al., 2011 (Adaptado).**

Túneis de vento também podem ser utilizados para avaliar os mecanismos de secagem de materiais a granel, devido ao fluxo de ar constante que escoar sobre a sua superfície. Entender o mecanismo de secagem é fundamental para se desenvolver procedimentos de retirada de umidade dos minérios ou para avaliar a umidade crítica em que o material começa a gerar emissão de particulado. Diante disso, Souza Pinto et al. (2015) avaliaram os mecanismos de secagem em concentrados de minério de ferro tipo *sínter feed*, utilizando uma unidade experimental composta de um túnel de vento soprador, construído em acrílico, de seção quadrada (145 mm x 145 mm) e comprimento de 2.300 mm, para promover a passagem de ar sobre o leito de minério de ferro, utilizando uma unidade de refrigeração para controlar a umidade relativa do ar e um sistema de resistência elétricas, que proporcionam a variação de temperatura do ar. A unidade experimental é mostrada na Figura 2.53. O *sínter feed* de minério de ferro utilizado apresentou granulometria com um tamanho máximo de 10 mm. A amostra foi acondicionada em uma bandeja, conforme mostrado na Figura 2.54. Souza Pinto et al. (2015) avaliaram quatro espessuras de leito na bandeja: 15, 30, 45 e 60 mm, sob as velocidades do ar de 5,0 e 7,0 m/s, variando a temperatura do ar em 25, 30 e 40 °C. A umidade relativa do ar no momento dos testes foi mantida em 40%.



**Figura 2.53 – Túnel de vento para estudo da desumidificação de sólidos.**  
**Fonte: Souza Pinto et al., 2015.**

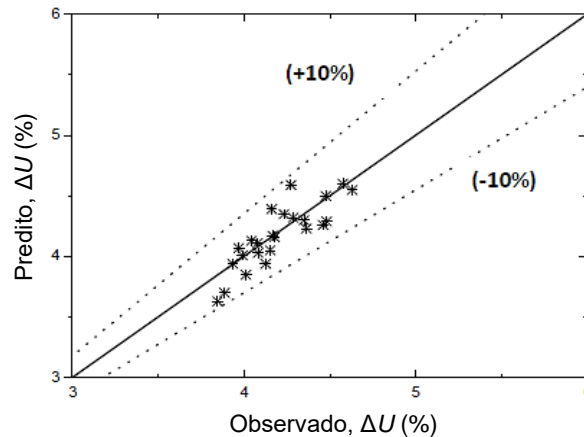


**Figura 2.54 – Vista do acondicionamento de sólidos na bandeja de secagem.**  
**Fonte: Souza Pinto et al., 2015.**

Os autores realizaram uma regressão não linear para o modelamento dos dados visando obter aderência aos dados obtidos experimentalmente. O modelo teve por objetivo entender a redução da umidade do *sinter feed* de minério de ferro indicando o peso de cada variável no processo, analisadas de acordo com a magnitude de seus expoentes. A Equação 2.4 apresenta o modelo gerado a partir dos resultados experimentais, no qual observa-se que dentre as variáveis avaliadas, a temperatura foi aquela que apresentou maior influência na perda de umidade do leito de *sinter feed*. A curva de paridade entre os dados previstos pela Equação 2.4 e observados experimentalmente, é apresentada na Figura 2.55, onde nota-se que os dados previstos apresentam boa correlação com os dados experimentais com desvios menores que 10%.

$$\Delta U = 1,053 T^{0,3068} V^{0,178} * e^{-0,166} * t^{0,130} \quad (2.4)$$

Sendo:  $\Delta U$  – variação de umidade (%);  $T$  – temperatura do ar (°C);  $V$  – a velocidade do ar (m/s);  $e$  – espessura do leito (mm);  $t$  é o tempo (min).



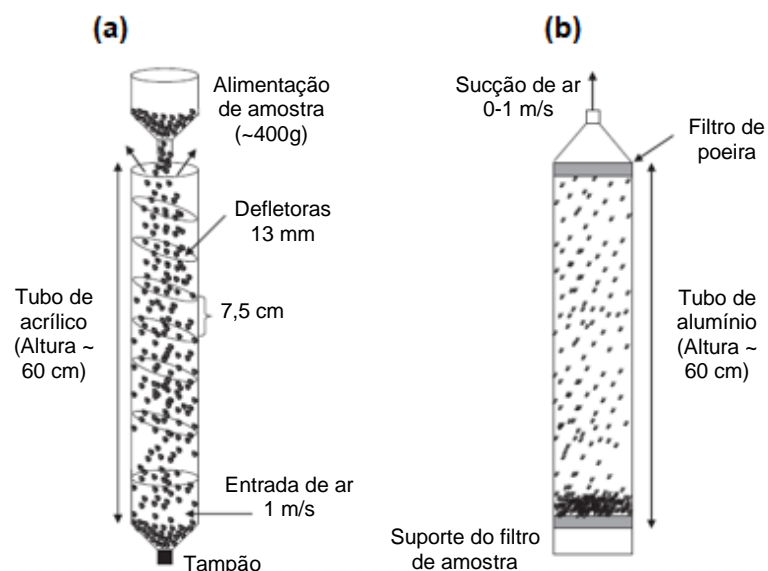
**Figura 2.55 – Curva de paridade do modelo de previsão de redução de umidade.**  
**Fonte: Souza Pinto et al., 2015.**

### 2.5.3. Torre de Poeira

Copeland e Kawatra (2011) avaliaram diversos métodos para medir a formação de poeira de materiais granulares. Esta avaliação baseou-se parâmetros tais como: integridade mecânica, capacidade de lidar com grandes amostras (maior que 1 kg), 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 manuseio do minério de ferro (impactos e altura de queda). Dessa forma, os autores encontraram a técnica de torre de poeira como sendo a mais adequada para ser utilizada em suas pesquisas. A seguir, são apresentadas algumas torres de poeiras utilizadas como base para a torre de poeira desenvolvida por esses autores.

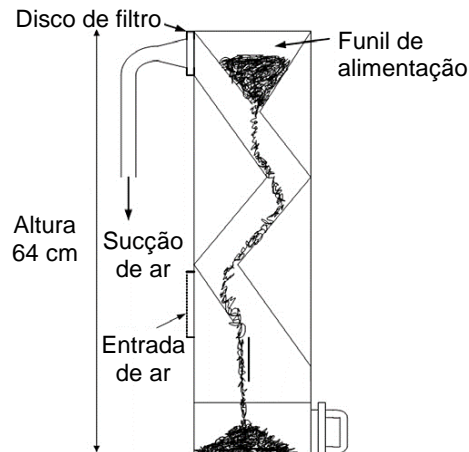
O Conselho de Pesquisa de Alberta (*Alberta Research Council - ARC*) desenvolveu um medidor de micropartículas na forma de uma coluna, projetada para pós finos, a qual usa aproximadamente 20 g de poeira carregada em um filtro no fundo da coluna. A coluna é selada no topo com um segundo filtro de ar que faz parte de um sistema de vácuo. O ar é então pulsado (altas taxas de vácuo em ciclos) para fluidizar o material no filtro inferior. Em seguida, o vácuo é ajustado a uma taxa constante (velocidades ajustadas dentro de uma faixa de 0-1 m/s) e a poeira no ar é filtrada à medida que o ar a empurra para cima e para fora da coluna, conforme ilustrado na Figura 2.56a. A principal preocupação desta abordagem é que apenas as partículas

finas podem ser usadas, ou seja, não é possível estudar os efeitos de supressores de pó em partículas grandes, como por exemplo a pelota. Utilizando o mesmo princípio, o Centro Internacional de Desenvolvimento de Fertilizantes (*International Fertilizer Development Center - IFDC*) desenvolveu uma torre para caracterizar a geração de poeira de fertilizantes granulados, na qual 400 g de amostra caem a uma altura de 60,96 cm. Um fluxo de ar é injetado no fundo da coluna para produzir uma velocidade nominal de 1 m/s. Este fluxo de ar foi capaz de remover partículas mais finas que 140  $\mu\text{m}$  da amostra. A quantidade de pó no ar é então calculada medindo a quantidade de material que foi coletada no fundo da coluna e subtraindo-a da quantidade de material alimentado no topo da coluna. A Figura 2.56b ilustra a coluna utilizada pelo IFDC, a qual é construída com chapas de acrílico, tornando difícil a utilização de materiais com grandes granulometrias, alto peso específico e dureza, como as pelotas de minério de ferro, devido a fragilidade da estrutura a impactos (COPELAND e KAWATRA, 2011).



**Figura 2.56 – Conceitos de torre de poeira: a) ARC e b) IFDC.**  
**Fonte: Copeland e Kawatra, 2011.**

Nos dois modelos de torre de poeira mostrados na Figura 2.55, amostras como o minério de ferro não estão sujeitos aos tipos de abrasões, impactos, colisões e queda livre, comumente encontradas no seu manuseio. Diante dessas limitações, o IFDC também projetou uma torre de poeira com inclinações (Figura 2.57), a qual deveria ser feita de aço e usada para material grosseiro, adequados para experimentos com pellets de minério de ferro, embora, este tipo de torre de poeira nunca foi construído e testado pelo IFDC.



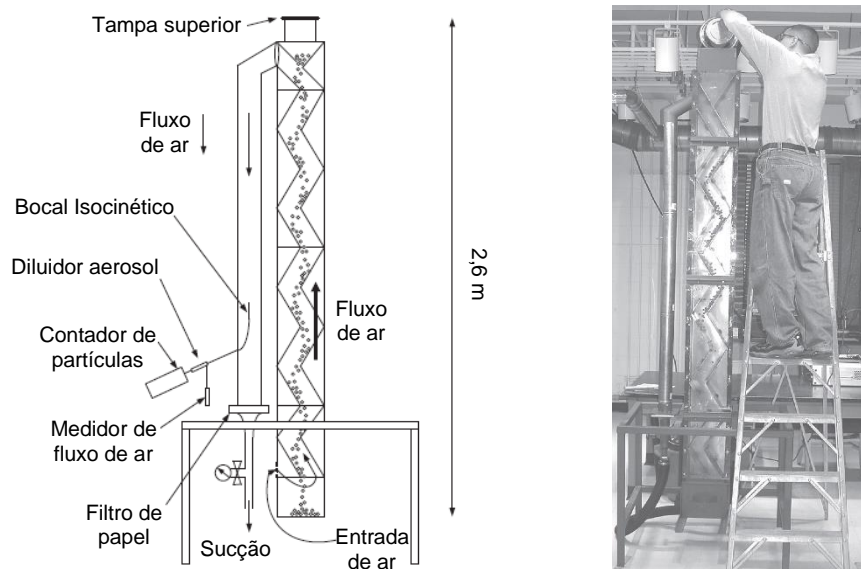
**Figura 2.57 – Projeto conceitual da torre de poeira com inclinações do IFDC.**  
**Fonte: Copeland e Kawatra, 2011.**

Com base nas três torres apresentadas, Copeland e Kawatra (2011) utilizaram o projeto conceitual da torre de poeira com inclinações do IFDC como base para o projeto e construção da sua torre de poeira, uma vez que esse projeto seria capaz de suportar os impactos das pelotas de minério de ferro, permitir que grandes quantidades de amostras sejam testadas (isso é importante para obter uma amostra representativa) e um fluxo de ar contínuo para permitir a medição direta dos níveis de poeira. Além disso, algumas modificações foram feitas para atender as condições de ensaios com pelotas de minério de ferro, tais como:

- Filtro coletor foi orientado horizontalmente para evitar perdas das partículas coletadas;
- Aumento da altura de queda para 2,43 m, sendo essa comumente encontrada durante o manuseio de pelotas.
- Suavização a conexão entre a saída na parte superior da torre e a sua tubulação lateral, para minimizar a perda de poeira na curva e diminuir o impacto do escoamento ao mudar de direção na tubulação lateral;
- Adição de uma porta de amostragem na tubulação lateral de ar e uso de equipamento para medir diretamente as concentrações de poeira (MP<sub>10</sub> ou MP<sub>2,5</sub>) dentro da torre de poeira, para serem comparados com os padrões da EPA.

A Figura 2.58 ilustra a torre de poeira projetada e construída por Copeland e Kawatra (2011). No comissionamento da bancada, os autores relatam que as pelotas passam facilmente através da torre e produziram quantidades mensuráveis de poeira

no ar. A torre não apresentou nenhum vazamento de ar com poeira. Houve acúmulo de material no interior da torre, no entanto, como o propósito da torre é examinar a quantidade de poeira que é produzida em cada experimento, o material que fica acumulado dentro da torre não é considerado como poeira em suspensão. O procedimento de ensaio dos testes na torre de poeira inicia-se com a mistura de 1 kg de pelotas de minério de ferro e 10g de seus finos, em um recipiente cilíndrico, girando-o lentamente, enquanto uma quantidade de água ou solução de supressor de pó é pulverizada sobre as pelotas. Após o preparo, a amostra passa por um tempo de cura de 30 min sob condições ambientais e, em seguida, é despejada na torre de poeira. À medida que o material cai através da torre de poeira, ele atinge várias placas planas (simulando múltiplos impactos), e passa por uma contracorrente de ar a uma vazão de 9 l/min, a qual é responsável por transportar as partículas de poeira no ar através da torre até o duto lateral, onde é captado por um bocal isocinético acoplado a um contador de partículas, utilizado para medir as quantidades de  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ .

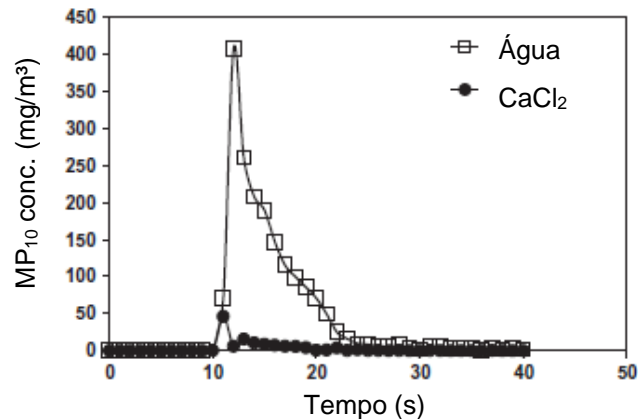


**Figura 2.58 – Torre de poeira desenvolvida Copeland e Kawatra.**  
**Fonte: Copeland e Kawatra, 2005.**

O contador começa a medir as partículas no tempo igual a zero, para estabelecer uma linha referência, e após 10 segundos, quando o material é liberado no topo da torre, a concentração de poeira atinge um valor máximo ("concentração de pico"). Com a contínua circulação de ar no interior da torre, a concentração diminuiu até que toda a poeira seja removida. A Figura 2.59 mostra como a concentração de poeira muda durante o tempo de ensaio, para dois tipos de supressores avaliados



(água destilada e  $\text{CaCl}_2$  – 4% em massa), a uma taxa de dosagem de 4 kg de supressor para cada tonelada de pelotas (COPELAND E KAWATRA, 2011).



**Figura 2.59 – Influência do  $\text{CaCl}_2$  na supressão de  $\text{MP}_{10}$ .**  
**Fonte: Copeland e Kawatra, 2011.**

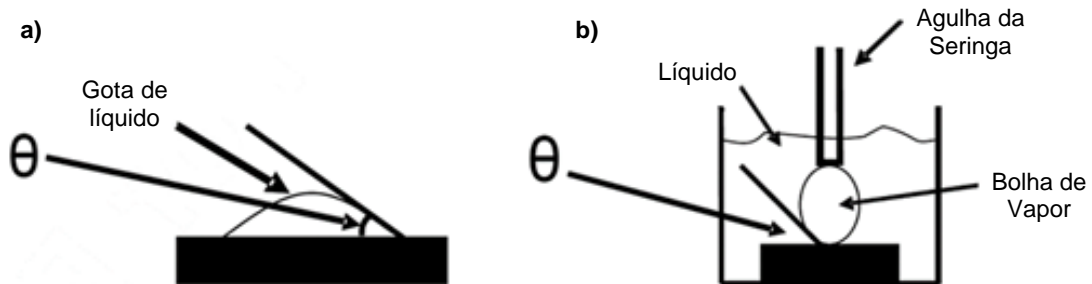
#### 2.5.4. Molhabilidade

Alguns métodos para avaliar as características de molhabilidade de materiais tem sido usado para caracterizar a eficácia de supressores. Estes métodos incluem medidas de ângulo de contato, taxas de absorção de partículas finas e penetração de líquidos em leito de partículas (COPELAND et al., 2009). Segundo Wu et al. (2007), os fatores importantes na supressão de poeira com pulverizadores de água são: baixo ângulo de contato, envolvimento rápido de partículas pelo supressor e penetração eficaz de supressores no leito de partículas.

O método do ângulo de contato é talvez o mais utilizado, embora existam algumas dificuldades associadas à medição e interpretação dos ângulos de contato, este é um dos métodos mais comuns de avaliação da molhabilidade. O ângulo de contato ( $\theta$ ) é um indicador da interação entre a interface líquido-sólido e a interface líquido-vapor. Um baixo ângulo de contato significa que o supressor molha efetivamente o material, aumentando assim a capacidade de reduzir emissão de poeira. As duas técnicas primárias de medição do ângulo de contato são o da gota séssil e o da bolha aprisionada. Estes métodos são mostrados, respectivamente, na Figura 2.60a e Figura 2.60b. De forma simplificada, a técnica de gota séssil coloca uma gota de líquido na superfície da amostra, enquanto a técnica de bolha aprisionada

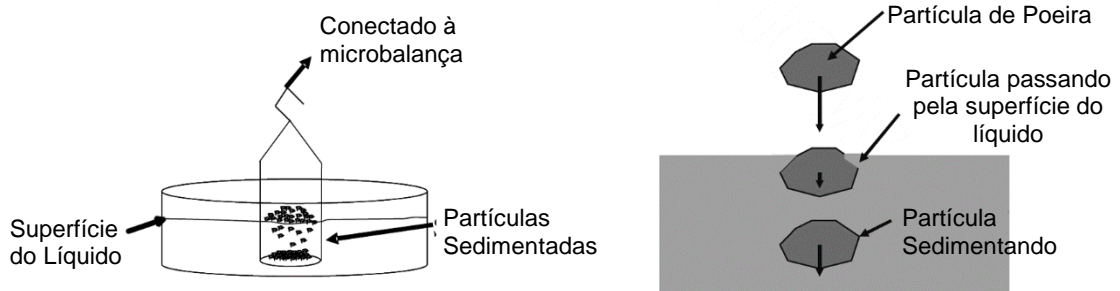


coloca uma bolha de vapor na superfície de uma amostra imersa em solução líquida. Durante a medição, a agulha deve permanecer em contato com a bolha para evitar a sua distorção (COPELAND e KAWATRA, 2005).



**Figura 2.60 – Ângulo de contato através da (a) gota séssil e (b) bolha aprisionada.**  
**Fonte: Copeland e Kawatra, 2005.**

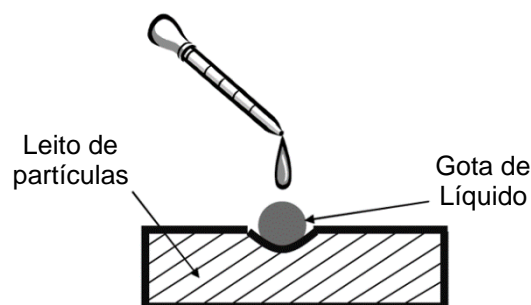
Diversos estudos realizados para avaliar a eficiência de supressores de poeira de carvão, argumentam que a eficácia do controle é maximizada quando o supressor envolve as partículas muito rapidamente (MOHAL e CHANDER, 1986; MOHAL, 1988, KILAU, 1993, KIM, 1995). O teste de imersão de partículas mede a taxa com que partículas sólidas finas, quando despejadas na superfície de um líquido, são totalmente imersas. Segundo Mohal e Chander (1986), esse teste foi inicialmente desenvolvido por Draves e Clarkson (1931) para determinar e comparar a eficiência de agentes molhantes, e tem sido tradicionalmente empregado e considerado como um dos métodos de medição simples e mais convencionais para analisar o impacto de soluções na molhabilidade de materiais sólidos. Posteriormente, foi modificado por Walker et al. (1952), para determinar a molhabilidade de certas soluções de surfactante em partículas de carvão. O aparato experimental utilizado no teste de imersão de partículas é ilustrado na Figura 2.61a, bem como o mecanismo de sedimentação das partículas (Figura 2.61b). Para este experimento, uma quantidade fixa de material fino (~ 40 mg) é lançada na superfície líquida a partir de uma altura de 20 mm. Conforme o líquido começa a molhar as partículas, elas sedimentam em um recipiente suspenso abaixo da superfície do líquido, o qual está conectado à uma micro balança sensível, para registrar o peso das partículas. A quantidade de tempo necessário para a amostra inteira se molhar na superfície e assentar na balança é definido como o tempo de molhamento. O teste avalia o quão rápido um supressor envolve partículas finas, ou seja, quanto menor for o tempo de molhamento, maior a eficiência do supressor (COPELAND e KAWATRA, 2005).



**Figura 2.61 – a) Teste de imersão de partículas e b) o mecanismo de sedimentação das partículas.**

**Fonte: Copeland e Kawatra, 2005.**

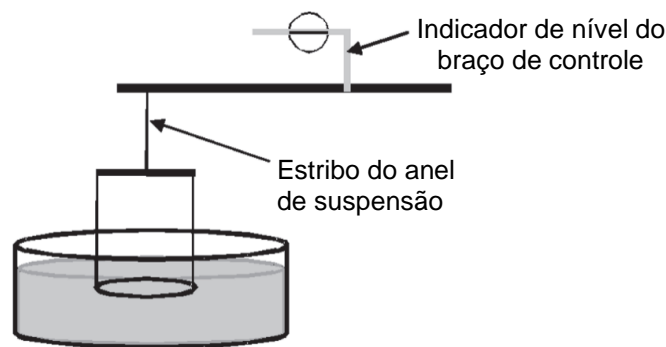
A penetração do supressor em um leito de partículas é considerada como um importante parâmetro na seleção de um supressor de poeira. KILAU (1993) utilizou esse método para determinar a capacidade de um supressor envolver partículas finas de carvão para melhorar o controle de poeira. O objetivo deste teste é examinar a rapidez com que uma gotícula de líquido penetra em um leito de partículas. No teste de penetração da gota, um leito de partículas é colocado em um prato de Petri de 25 mililitros, e uma depressão hemisférica com um diâmetro de 12 mm é criada para adição de 200  $\mu$ l de supressor (Figura 2.62). Após a adição do líquido, observa-se o tempo total requerido para que a gotícula seja completamente embebida no leito de partículas (COPELAND et al., 2009). A área molhada no leito de partículas também pode ser utilizada como parâmetro para avaliar o desempenho de molhamento. Em geral, quanto menor o tempo de penetração e a maior área molhada, melhor será o desempenho do agente químico. Para materiais hidrofóbicos, esse tempo pode demorar mais de 30 minutos para penetrar a camada, enquanto para materiais hidrofílicos, a gota penetra em alguns segundos (WU et al., 2007).



**Figura 2.62 – Teste de penetração de gota em leito de partículas.**

**Fonte: Copeland e Kawatra, 2005.**

Os testes de molhabilidade estão diretamente relacionados com as características da tensão superficial do líquido, pois é o fator mais significativo que afeta a molhabilidade de um líquido e, apenas após atingido seu valor crítico, outros fatores começam a ser dominantes (KILAU, 1990). Zisman (1964) foi o primeiro a propor o conceito de tensão superficial crítica, como sendo a tensão de superfície necessária para o espalhamento espontâneo de um líquido sobre uma determinada superfície sólida. Entre os vários métodos existentes para medir a tensão superficial de um líquido, o método do prato de Wilhelmy, é o mais utilizado, conforme mostrado na Figura 2.63 (ERBIL, 2006).



**Figura 2.63 – Equipamento de testes de tensão superficial.**  
**Fonte: Copeland e Kawatra, 2005.**

Nesse teste, uma fina placa de vidro ou platina é parcialmente imersa no líquido de teste, causando um menisco formado em torno da placa, e a força capilar na placa devido ao molhamento é determinada pela microbalança ou tensiômetro. Essa técnica mede a força necessária para puxar a placa através da superfície da solução. A força medida é diretamente proporcional à tensão superficial da solução, a qual pode ser calculada usando a equação de Wilhelmy mostrada na Equação 2.5 (ERBIL, 2006).

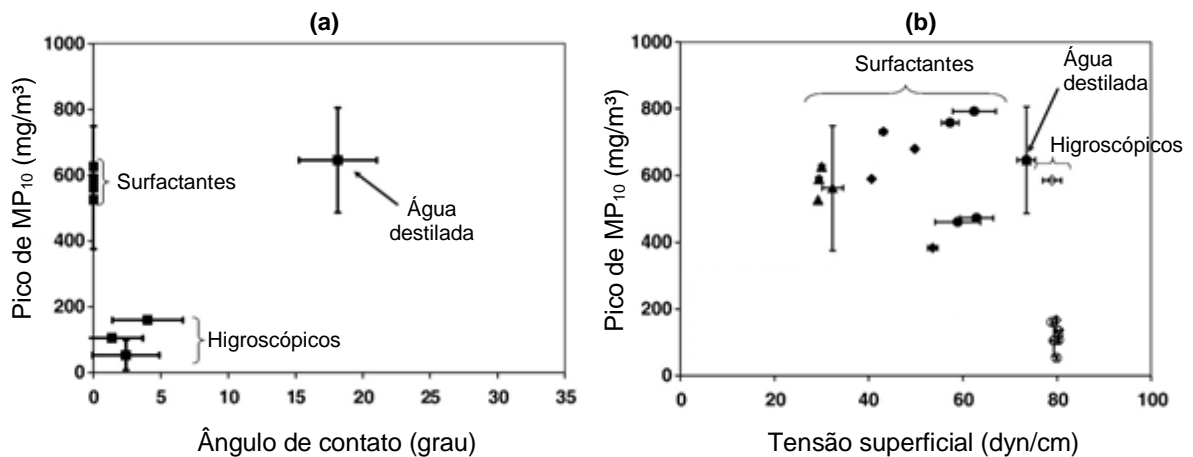
$$\gamma = \frac{F_c}{(2w + 2d) \cos \theta} \quad (2.5)$$

Sendo:  $w$  e  $d$  – largura e espessura da placa, respectivamente;  $\gamma$  – tensão superficial;  $F_c$  – força capilar na placa;  $\theta$  – ângulo entre o líquido e a placa.

Diversos estudos na literatura relacionam diretamente a eficiência na supressão de poeira com a capacidade de molhamento do supressor (CHANDER et al., 1987; MOHAL, 1988; KIM, 1995), apesar de todos esses estudos terem sido realizados para o carvão, avaliando-se somente as características de molhabilidade do supressor com as partículas de carvão. Copeland e Kawatra (2005) foram os primeiros a estudar o efeito molhabilidade na supressão de poeira de minério de ferro. Considerando os resultados positivos do uso de surfactantes na supressão de poeira de carvão, acreditava-se, portanto, que o controle do particulado de minério de ferro também poderia ser melhorado com a utilização de reagentes que aumentasse a molhabilidade. Dessa forma, três surfactantes (glicol acetilénico, éster alquílico e éter metílico de polipropileno glicol) e três reagentes higroscópicos (cloreto de cálcio, cloreto de magnésio e metasilicato de sódio) foram avaliados, correlacionando os resultados obtidos nos testes de molhabilidade, com os testes em torre de poeira, para avaliar sua capacidade de suprimir  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ , cujo critério de eficiência seria que os supressores testados deveriam ser mais eficazes que a água destilada, a qual foi utilizada como referência. Os reagentes higroscópicos foram testados pois reduzem os efeitos da perda de umidade na supressão de poeira, uma vez que, à medida que a água usada para agregar as partículas evapora, o material particulado volta a entrar em suspensão. Portanto, podem ser utilizados para neutralizar o efeito negativo da evaporação da água, reduzindo a perda de umidade e tornando a água eficaz como um supressor de poeira por períodos mais longos de tempo (COPELAND e KAWATRA, 2005).

A Figura 2.64 apresenta os resultados obtidos, correlacionando, os testes de molhabilidade e torre de poeira. Os resultados dos testes de ângulo de contato e de tensão superficial, confirmaram que os agentes surfactantes melhoram as características de molhabilidade. No entanto, a redução no ângulo de contato não pareceu controlar as emissões de particulado de minério de ferro. Os reagentes surfactantes reduziram mais o ângulo de contato em comparação aos higroscópicos, mas os resultados mostram que seu efeito foi tão efetivo quando o uso somente de água destilada (Figura 2.64a). O mesmo comportamento foi observado na Figura 2.64b, onde observa-se que a redução da tensão superficial pelo efeito de agentes surfactantes não produz efeito nenhum na redução da concentração de  $MP_{10}$ , o que está de acordo com o trabalho de Zimon (1969), que afirma que as forças que unem as partículas se tornam fracas, quando ocorre a redução da tensão superficial, o que

significa que elas poderiam quebrar facilmente. Portanto, a melhora nas características de molhabilidade de um supressor, não representam nenhum aumento significativo na eficiência de supressão poeira de minério de ferro. Dessa forma, a eficiência na supressão de poeira não está relacionada diretamente com a facilidade de o supressor molhar a partícula, mas também da característica do material particulado, sendo os agentes surfactantes mais efetivos para materiais hidrofóbicos como o carvão.



**Figura 2.64 – Efeito da molhabilidade na supressão de MP<sub>10</sub> de minério de ferro.**  
**Fonte: Copeland et al., 2009.**

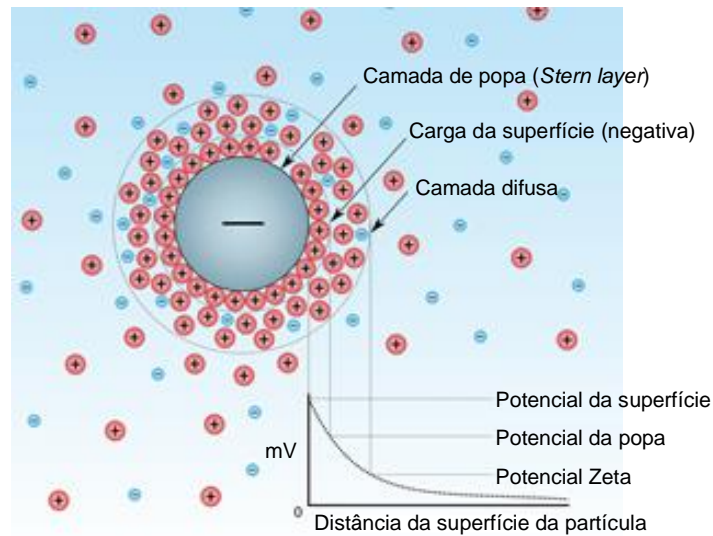
### 2.5.5. Potencial Zeta

Dentre os reagentes utilizados por Copeland et al. (2009), os higroscópicos tiveram maior eficácia na supressão de MP<sub>10</sub>. Esses reagentes são sais inorgânicos, formado por íons positivos (cátions) e íons negativos (ânions), ligados por atração eletrostática proporcionando uma ligação iônica, os quais, quando em solução aquosa, agem como eletrólitos. Tal fenômeno acontece porque sais são constituídos por átomos iônicos, ou seja, sua atração é por ligação iônica e, em solução, esses íons se dissociam (se separam) e ficam “livres”, conduzindo assim a corrente elétrica. A melhora na supressão de material particulado obtida por Copeland et al. (2009) pode estar associada à diminuição da carga elétrica da solução, quando eletrólitos são adicionados, reduzindo as forças de repulsão entre os grupos hidrofílicos iônicos, resultando em uma maior tendência de formação de aglomerados, os quais possuem

maior peso e menor tendência a dispersar no ar (PORTER, 1994). Esse efeito dos eletrólitos também é amplamente empregado no tratamento de efluentes através de reagentes coagulantes, responsáveis pela aglomeração do material sólido em suspensão na água. Sais de alumínio e de ferro são os coagulantes mais utilizados nesse processo, pois quando em solução, seus cátions altamente carregados ( $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ ), em contato com as partículas coloidais, que sob condições típicas são carregadas negativamente, hidrolisam rapidamente, causando desestabilização efetiva e formando precipitados insolúveis. Os precipitados adsorvem às partículas na água, neutralizando sua carga, e subsequentemente, permitem a interpartícula em ponte para formação dos aglomerados. A carga superficial de particulados em um líquido é fortemente influenciada pelo pH (ou pela concentração) da solução e da dosagem do coagulante (DUAN e GREGORY, 2003).

A maioria dos materiais particulados em contato com um líquido adquirem uma carga elétrica em sua superfície. Uma partícula está carregada eletricamente quando possui uma pequena quantidade de carga desequilibrada. Essa carga pode aparecer pela dissociação de grupos ionogênicos na superfície da partícula e pela adsorção diferencial de íons da solução na superfície da partícula. A carga líquida na superfície da partícula afeta a distribuição de íons na sua vizinhança, aumentando a concentração de íons de carga oposta junto à superfície, formando uma dupla camada elétrica na interface da partícula com o líquido, a qual divide-se em duas regiões: uma região interna que inclui íons fortemente ligados à superfície e uma região exterior onde a distribuição dos íons é determinada pelo equilíbrio entre forças eletrostáticas e movimento térmico (ZAMBERLAN, 2018). O potencial elétrico nessa região decai com o aumento da distância da superfície, conforme mostrado na Figura 2.65. Em um campo elétrico, cada partícula e os íons mais fortemente ligados à mesma se movem como uma unidade, e o potencial no plano de cisalhamento entre essa unidade e o meio circundante é chamada potencial zeta. Quando uma camada de íons é adsorvida na superfície da partícula, ela move o plano de cisalhamento para longe da superfície e altera o potencial zeta. Portanto, o potencial zeta é função da carga superficial da partícula, de qualquer camada adsorvida na interface com o meio e da natureza e composição do meio que a circunda (BAGUL et al., 2012). Uma das aplicações do potencial zeta na supressão de poeira está relacionado a adsorção do surfactante na superfície da partícula de carvão e a estabilidade da partícula de carvão em solução de surfactante. Segundo Kost et al. (1980), a grande diferença entre o potencial zeta

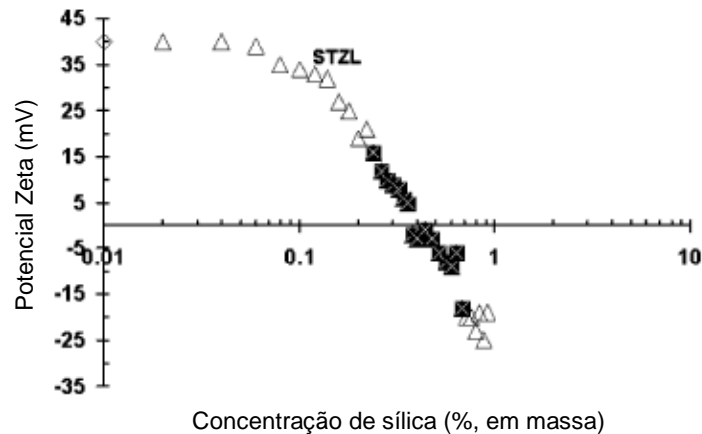
do carvão na água e o carvão na solução de surfactante pode ser tratada como um aspecto da eficácia melhorada.



**Figura 2.65 – Diferença de potencial de uma partícula em um meio de dispersão. Fonte: Zamberlan, 2018.**

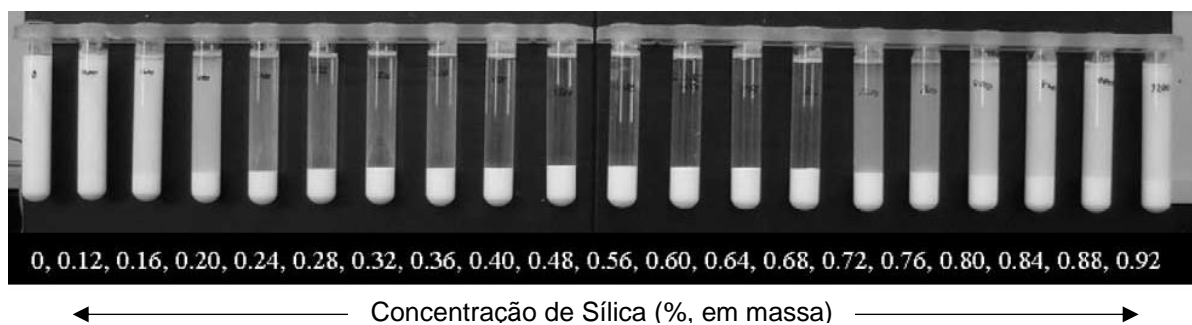
O potencial zeta é um indicador chave da estabilidade das dispersões coloidais. A magnitude do potencial zeta indica o grau de repulsão eletrostática entre partículas adjacentes de carga similar em uma dispersão. O seu valor muda gradualmente de um máximo positivo para um máximo negativo, passando pelo ponto onde assume o valor nulo, o qual é chamado de ponto isoelétrico. Nesse ponto, nenhuma carga está presente nas partículas, portanto elas podem coagular e se estabilizar facilmente (RAJU, 2012). A Figura 2.66 mostra os resultados experimentais do potencial zeta para partículas de alumina carregada positivamente, na presença de sílica carregada negativamente. Como esperado, a adição de partículas carregadas negativamente a uma suspensão de alumina com carga positiva causou uma eventual reversão de carga. À medida que o número de partículas de sílica aumenta, o potencial zeta da amostra se move em direção ao da sílica pura. Antes que ocorra a reversão de carga, as partículas se movem através de uma região de instabilidade, indicando região onde ocorre a coagulação, destacado pelos pontos escuros na curva de potencial zeta (YATES et al., 2005). Um elevado potencial zeta confere estabilidade ao sistema, isto é, a solução ou dispersão resistirá à agregação. Quando o potencial é pequeno, forças atrativas podem exceder essa repulsão e a dispersão pode se romper e flocular. Quanto maior o potencial zeta (negativo ou

positivo), mais provável que a suspensão seja eletricamente estabilizada, pois as partículas carregadas se repelem umas às outras e essa força supera a tendência natural à agregação, enquanto coloides com baixo potencial zeta tendem a coagular ou flocular (RATTANAKAWIN e HOGG, 2001).



**Figura 2.66 – Ponto isoelétrico da alumina em solução de sílica.**  
**Fonte: Yates et al., 2005.**

A utilização de partículas com cargas opostas para induzir a agregação é conhecida como heteroagregação e pode ser um importante parâmetro de avaliação de eficiência de supressores de poeira. Yates et al. (2005) realizaram testes de sedimentação em amostras de alumina a concentração de 2,5% (em massa), para determinar a faixa de concentração ótima de sílica, onde ocorre coagulação. As partículas de sílica de carga oposta (negativa) adsorvem na superfície da partícula de alumina (positiva) resultando em neutralização de carga, ligação e agregação. A região de instabilidade ocorre em uma faixa de concentrações de sílica próximas ao potencial zeta neutro, conforme mostrado na Figura 2.67.



**Figura 2.67 – Sedimentação de alumina em função da concentração de sílica.**  
**Fonte: Yates et al., 2005.**



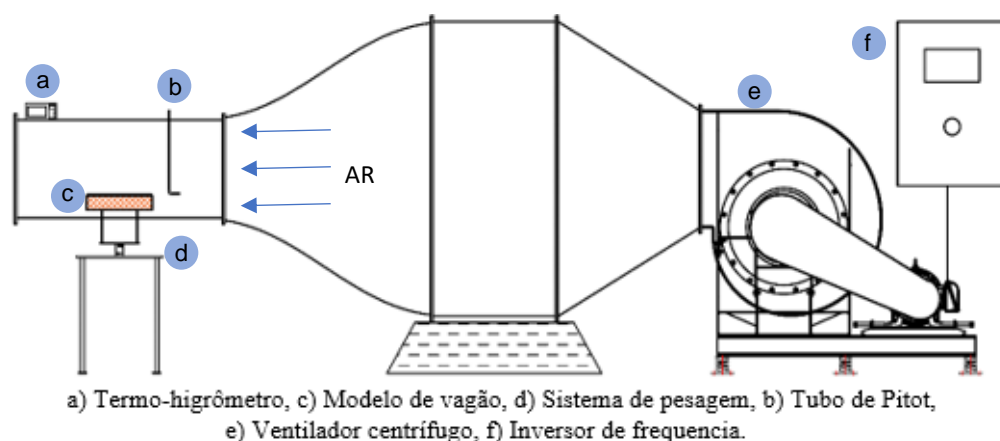
### 3. DESENVOLVIMENTO DE BANCADAS DE TESTES

Dentre as técnicas para avaliação de emissão de particulado disponíveis na literatura, neste trabalho optou-se por se utilizar o Túnel de Vento, devido à necessidade de se avaliar a emissão de particulados oriunda dos minérios transportados em composições ferroviárias, e a Torre de Poeira, uma vez que esse aparato é capaz de avaliar a emissão de particulados de uma vasta gama de produtos a granel. A seguir são apresentados os detalhes dos desenvolvimentos das bancadas de testes e suas respectivas metodologias.

#### 3.1. Túnel de Vento

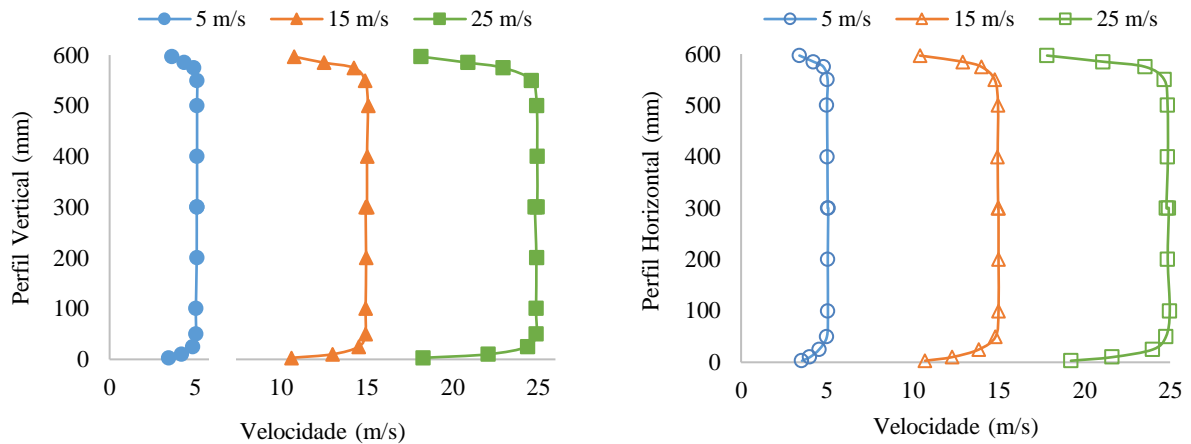
##### 3.1.1. Descrição da Bancada

Para avaliar a emissão de particulados durante o transporte de material em vagões de trem, um túnel de vento soprador de seção de teste aberta (600 mm x 600 mm) com comprimento de 1,8 m, razão de contração de 9 e velocidade máxima de 30 m/s, já existente no Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados (FLUIDPAR) foi adaptado para a avaliação de emissão de particulado. A Figura 3.1 mostra o desenho esquemático da bancada de ensaios.



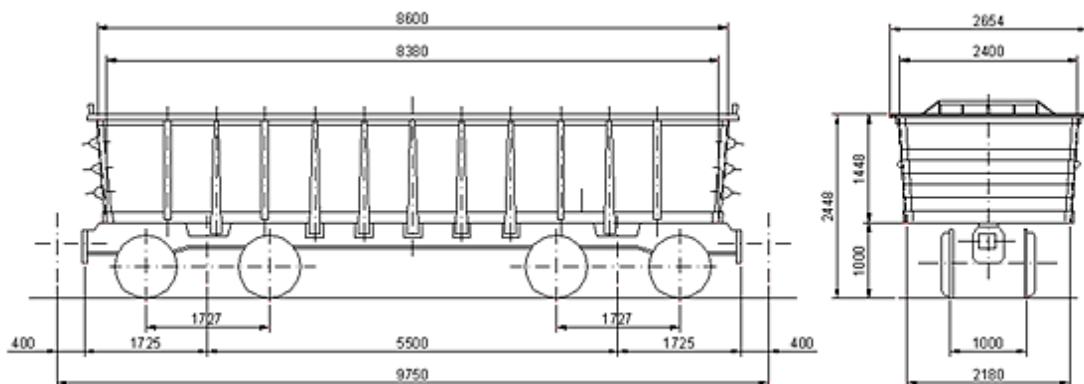
**Figura 3.1 – Bancada de ensaios de arrasto eólico em túnel de vento.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Esse túnel de vento possui um perfil de escoamento completamente desenvolvido e estável, ao longo da seção de testes, conforme mostra a Figura 3.2, para as velocidades de escoamento de 5, 15 e 25 m/s (SANTOS JUNIOR et al., 2015).



**Figura 3.2 – Perfil de velocidade do ar na seção de teste do túnel.**  
**Fonte: Santos Junior et al., 2015.**

Escolheu-se um vagão GDE comumente utilizado na Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) para transporte de minério de ferro, série 212600-1 a 213101-3, conforme mostrado na Figura 3.3, o qual teve suas dimensões sendo utilizadas como base para a construção do modelo de vagão a ser utilizado nos ensaios em túnel de vento.



**Figura 3.3 – Ilustração de um vagão utilizado na EFVM (dimensões em mm).**  
**Fonte: Vale, 2000.**

As dimensões do modelo de vagão foram definidas em função das dimensões da seção de teste do túnel de vento, no intuito de minimizar o efeito de parede sobre o modelo e o fator de bloqueio da seção transversal do túnel (aproximadamente 2,7%).

Além disso, levou-se em consideração a quantidade de material que seria necessário para preencher o modelo de vagão, não sendo desejável uma grande quantidade de material para cada ensaio, para evitar desperdícios. Diante desses fatores, optou-se por um modelo em escala 1:20 (430 mm x 120 mm x 72,4 mm), o qual foi construído em chapa metálica de 2 mm de espessura, permitindo assim que o modelo de vagão possa ser levado à estufa, para secagem do material ao término do ensaio. Na definição do fator de escala não foi considerado nenhuma análise de similaridade entre o modelo e o vagão real, uma vez que seria necessário que os tamanhos das partículas também fossem escalonados, o qual não é possível. A Figura 3.4 apresenta as dimensões do modelo de vagão preenchido com material. Por questões de padronização, todos os ensaios possuem uma altura de material igual a 10 mm, acima da borda superior do modelo de vagão.



**Figura 3.4 – Modelo de vagão construído em escala 1:20 (dimensões em mm).  
Fonte: Autoria própria, 2018.**

Para esse tipo de teste, o parâmetro de emissão de particulado avaliado é a medição da perda de massa de minério, causada pelo efeito do escoamento de ar sobre o leito de minério no modelo de vagão. Diante disso, foi necessário desenvolver um sistema de pesagem para o túnel de vento, o qual foi elaborado utilizando uma célula de carga modelo ALFA SV-200, acoplada a uma estrutura metálica resistente, de tal forma que não seja necessário a retirada do modelo de vagão do interior do túnel durante o ensaio para pesagem da perda de massa. O sistema possui uma base rígida metálica (Figura 3.5a) para fixação da célula de carga, que por sua vez serve de fixação para o suporte do modelo de vagão (Figura 3.5b). A chapa metálica inferior serve para fixação na célula de carga e fixação das barras roscadas, enquanto a chapa superior é a base onde será posicionado o modelo de vagão. O sistema possui quatro barras roscadas de 9,52 mm de diâmetro, utilizadas para regulagem da altura do vagão no interior da seção de testes do túnel de vento.



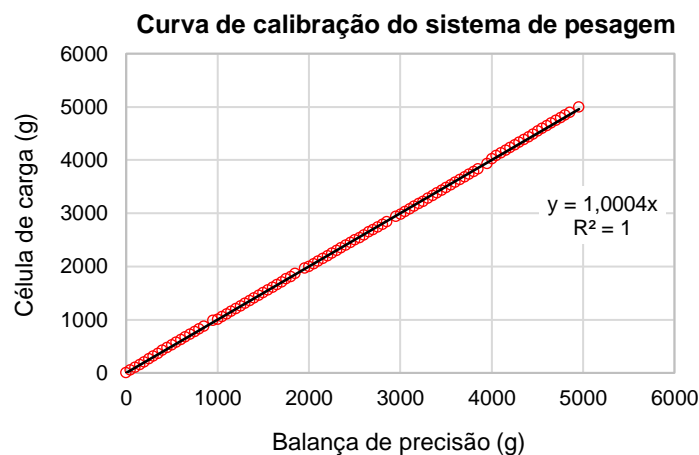
**Figura 3.5 – a) Sistema de medição do vagão; b) detalhe do suporte do vagão.  
Fonte: Autoria própria, 2018.**

A célula de carga SV200 é capaz de medir cargas de até 200 kg, com precisão ajustável até 4 casas decimais (em kg) e degrau de 1, 2 ou 5 g, ou seja, o passo em que o indicador de pesagem varia. No entanto, de acordo com o seu manual, valores muito baixos de degrau podem ocasionar grandes instabilidades na leitura do equipamento. Dessa forma, faz-se necessário, por meio da calibração da célula de carga, encontrar o menor valor de degrau possível, sem que ocorra grandes instabilidades. O processo de calibração pode ser encontrado no manual do equipamento, e consiste em adicionar pesos padrões, que foram previamente medidos na balança BK5000 com capacidade máxima de 5000 g, mínima de 0,2 g e resolução de 0,01 g. Os pesos foram adicionados a cada 50 g, até o máximo de 11 kg. A Figura 3.6 mostra os pesos padrões utilizados no sistema de pesagem durante o processo de calibração.



**Figura 3.6 – Sistema para calibração da célula de carga.  
Fonte: Autoria própria, 2018.**

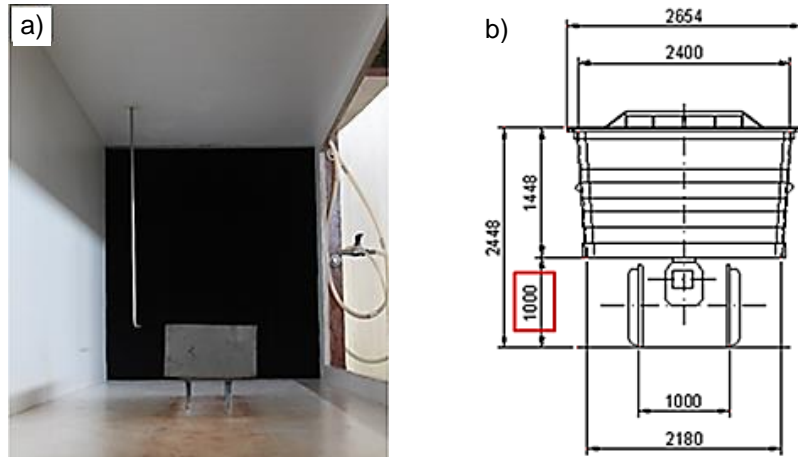
O procedimento de calibração foi dividido em duas etapas, que consistem no carregamento e no descarregamento dos pesos sobre a célula de carga, os quais foram repetidos cinco vezes. O objetivo de fazer essa calibração é verificar se a calibração feita através do indicador de pesagem está coerente com os valores obtidos na balança de precisão, com a menor instabilidade possível. Durante o processo de calibração, verificou-se que a menor resolução que seria possível sem grandes instabilidades na leitura foi de 5 g. A Figura 3.7 apresenta a curva de calibração da célula de carga em função das massas dos pesos padrões medidos na balança de precisão, mostrando que há um bom ajuste entre os dados obtidos. Os resultados podem ser consultados no APÊNDICE A.



**Figura 3.7 – Curva de calibração da célula de carga.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

A disposição do modelo de vagão no interior da seção do túnel é mostrada na Figura 3.8a. Nesta configuração, o modelo de vagão fica sobre o sistema de pesagem, o qual está posicionado no centro da seção de testes do túnel de vento. A posição central do modelo em relação à seção de testes foi definida a partir do critério estabelecido por Mehta (1977), o qual afirma que o escoamento na saída da contração, em geral, precisa de uma distância de 0,5 vezes o diâmetro hidráulico da câmara de teste (neste caso de 300 mm) para que não uniformidades no escoamento sejam reduzidas a um nível aceitável. Diferentemente do escoamento em dutos retos, o qual precisa de uma distância de 8 a 10 vezes o diâmetro hidráulico para estar completamente desenvolvido, o critério de Mehta (1977) é característico para o escoamento na seção de testes em túnel de vento, devido a influência da contração sobre o escoamento. Dessa forma, a borda de ataque do modelo de vagão encontra-

se a 685 mm da saída da contração, onde o escoamento da seção de testes encontra-se completamente desenvolvido e estável. A altura do modelo em relação à base da seção é igual a 50mm, referente à altura dos truques e rodeiros do vagão, mantendo-se a escala de 1:20 do modelo, em relação às dimensões do vagão (Figura 3.8b).



**Figura 3.8 – Disposição do modelo na seção de teste (dimensões em mm).  
Fonte: Autoria própria, 2018.**

A Figura 3.9 resume todos os instrumentos utilizados para os testes de arrasto eólico sobre modelos de vagões na seção de testes do túnel de vento. Um tubo de Pitot tipo L de 6 mm de diâmetro e um micro manômetro portátil KIMO MDP-2500, são utilizados para medir a velocidade do escoamento de ar. A umidade relativa do ar e a temperatura ambiente são medidos por meio de um termo higrômetro TESTO 622.



**Figura 3.9 – Instrumentos de medição instalados na seção de teste do túnel de vento.  
Fonte: Autoria própria, 2018.**

A Figura 3.10 mostra a bancada de ensaios de arrasto eólico para modelos de vagões de trem em túnel de vento, durante a realização de um ensaio.



**Figura 3.10 – Bancada de ensaios de arrasto eólico em túnel de vento.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

### 3.1.2. Metodologia de Testes

A metodologia de testes em túnel de vento desenvolvida inicia-se com a preparação da amostra de material para uma determinada umidade do material ( $U$ ), conforme a equação 3.1. Após definido a umidade de ensaio do material e a quantidade de material úmido, o processo de preparação inicia-se com a pesagem do material seco e da massa de água, os quais são suficientes para se obter uma massa de material úmido necessária para preencher completamente o modelo de vagão. Neste trabalho, a massa de material úmido de 8 kg é suficiente para o total preenchimento do vagão.

$$U = \frac{M_a}{M_a + M_s} = \frac{M_u - M_s}{M_u} \quad (3.1)$$

Sendo:  $M_s$  – Massa de sólidos;  $M_a$  – Massa de água;  $M_u$  – Massa de material úmido.

O material seco (sólidos) é então levado a um misturador automatizado de rotação controlável (Figura 3.11), e a água é adicionada gradualmente, proporcionando uma melhor eficiência na mistura. O tempo de mistura foi padronizado em 5 min a baixa rotação. Após a mistura do material, três amostras devem ser

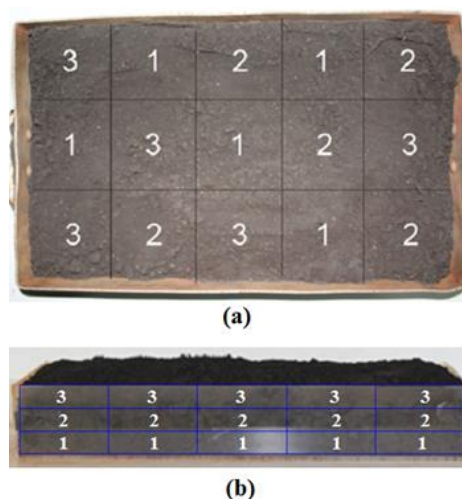


coletadas e levadas ao forno para secagem à 105°C, durante 24h, para verificação da umidade inicial da mistura.



**Figura 3.11 – Misturador automatizado.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

A mistura é levada à uma bandeja, onde é realizado o processo de estratificação do material úmido, para o preenchimento do modelo de vagão, conforme mostrado na Figura 3.12a. O modelo de vagão é preenchido de forma padronizada, seguindo a estratificação do material na bandeja (Figura 4.12b), ou seja, o material da posição 1 na bandeja, será aquele da primeira camada do modelo de vagão, o material da posição 2, será a segunda camada e o da posição 3, a última camada. Esse procedimento foi elaborado para proporcionar uma melhor mistura do material ao longo do modelo de vagão, e evitar possíveis regiões de material com maior umidade.



**Figura 3.12 – a) Estratificação de material; b) Preenchimento do modelo de vagão.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**



Após o completo preenchimento do modelo de vagão, a superfície do material úmido é nivelada com um auxílio de um molde metálico, de formato de pirâmide de 30 mm de altura (Figura 3.13). O formato do coroamento bem como sua altura, foram obtidos junto ao ITV, e representam uma característica comum das cargas de minério de ferro da Vale transportados em vagões. Em seguida, o modelo de vagão é levado à seção de teste do túnel de vento, com o sistema de pesagem já calibrado com a tara do modelo de vagão, onde a massa inicial de material úmido é medida.



**Figura 3.13 – Formação da altura e ângulo da pila de material.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Para testes com agentes químicos, após o posicionamento do modelo na seção de testes, tem-se a aplicação dos agentes supressores. A homogeneização do supressor com água destilada é feita em um misturador durante 5 min, em baixa velocidade, conforme mostrado na Figura 3.14a. Em seguida, o produto é levado à um pulverizador para aplicação do supressor sobre a superfície do material que está posicionado no interior do túnel de vento (Figura 3.14b).



**Figura 3.14 – a) Procedimento de preparo da solução aquosa; b) Aplicação da solução sobre a superfície do material.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Após a aplicação do supressor, o modelo de vagão é levado até uma bancada com duas lâmpadas incandescentes de 40 Watts de potência, para a cura durante 30 min do supressor aplicado (Figura 3.15). Finalizado o tempo de cura, o vagão é levado à seção de teste do túnel de vento para início do ensaio.



**Figura 3.15 – Cura do reagente aplicado na superfície do material.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Com o vagão posicionado sobre o sistema de pesagem, o túnel de vento é acionado a uma determinada velocidade de escoamento. A cada 10 min, o escoamento de ar é interrompido para pesagem da massa de material no vagão, para o cálculo da perda de massa total -  $P$  (material úmido) ao longo do ensaio (Equação 3.2), e para medição das condições ambientais (temperatura, pressão e umidade relativa do ar), visando acompanhar as variações que ocorrem durante o ensaio. Em caso de rompimento/remoção do material na superfície do material, o ensaio é paralisado e o teste é descartado. O tempo de duração do ensaio pode variar conforme a variação da perda de massa do material. Nesse trabalho, serão avaliados dois cenários: um avaliando apenas o efeito da variação de umidade do material e da velocidade de escoamento, cuja duração total do ensaio é padronizada em 90 min, e o segundo cenário é para a avaliação do desempenho de supressores químicos. Como o efeito dos supressores químicos na supressão de material particulado é maior que apenas com o material úmido, a perda de massa seria muito baixa em 90 min de testes, portanto, para esses ensaios, a duração total do teste é de 6 horas.

$$P = 1 - \frac{\text{Massa de material a cada intervalo de tempo } (M_f)}{\text{Massa de material no início do ensaio } (M_i)} \quad (3.2)$$

Além da perda de massa, relacionada à emissão de particulado do leito de material no modelo de vagão, o mecanismo de secagem do material durante o ensaio também pode ser avaliado de duas formas distintas. A primeira utiliza a metodologia de avaliação da umidade do material remanescente no modelo de vagão ao término do ensaio. Nessa metodologia, o modelo de vagão é levado diretamente à estufa, para secagem do material a 100 °C por 24 h. Como a umidade do material no início do ensaio é medida por meio da coleta do material úmido após o processo de mistura, pode-se avaliar a perda de umidade no ensaio por meio da Equação 3.1. A segunda forma de avaliação do mecanismo de secagem, utiliza o processo de estratificação do material no interior do modelo de vagão, também ao término do ensaio. Nessa metodologia, todo o material remanescente no interior do vagão é dividido em 5 seções ao longo do seu comprimento e em 6 camadas ao longo da sua altura, conforme ilustrado na Figura 3.16. Portanto, 30 amostras são coletadas, as quais são levadas a estufa para secagem do material a 100 °C por 24 h. Dessa forma, pode-se avaliar o gradiente de umidade em diversos pontos do material no interior do modelo de vagão.



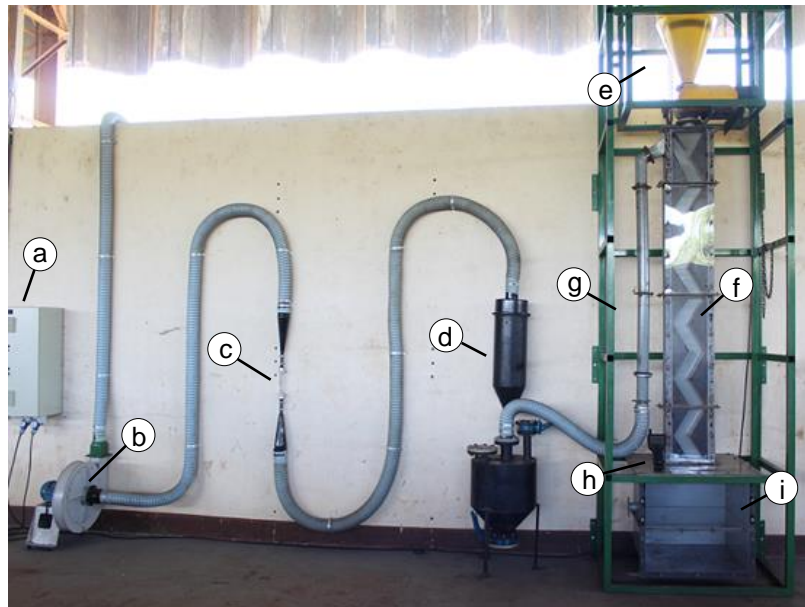
**Figura 3.16 – Metodologia estratificada de coleta de amostras de material para avaliação de umidade.**

**Fonte: Autoria própria, 2018.**

## 3.2. Torre de Poeira

### 3.2.1. Descrição da Bancada

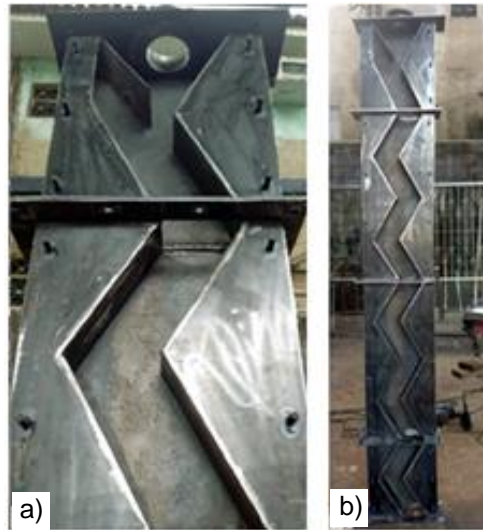
A segunda bancada foi desenvolvida usando como base o conceito de torre de poeira aperfeiçoado pelo *Michigan Technological University* (MTU), para estudos de caracterização de material particulado oriundo de pelotas de minério de ferro, a qual é capaz de avaliar as condições dinâmicas do processo de manuseio, tais como chutes de transferências, e medir a geração particulado durante esse processo. A premissa do projeto foi desenvolver a bancada de ensaios para atender condições geométricas e de fluxo no interior da torre, similares as da torre de poeira da MTU, uma vez que esta já possui resultados confiáveis na literatura. O detalhamento das dimensões da torre de poeira são apresentadas por Copeland e Kawatra (2005), na qual as seguintes informações são fundamentais: altura de queda do material na torre igual à 2,6 m; área da seção do canal de ar, pelo qual o material sólido e o ar passam, é retangular e igual à 108,7 cm<sup>2</sup>; a vazão de ar no interior da torre (8 l/s). Além dessas informações, algumas modificações, para adequar às necessidades do atual projeto foram realizadas, como por exemplo, um sistema de elevação composto de uma moega, como o objetivo de facilitar a elevação do material a ser ensaiado até o topo da torre de poeira e aumentar a autonomia do ensaio, além de uma válvula rotativa na descarga da moega, para controlar o fluxo de massa de material através da torre. A estrutura principal da bancada, na qual está instalado a moega de armazenamento, a torre de poeira e o reservatório, tem altura total de 5m e foi construída com metalon quadrado de 50 mm x 50 mm e espessura de 2 mm. Cantoneiras de 50 mm x 50 mm e comprimento de 250 mm, com furos de 9,52 mm, foram soldadas nas laterais da estrutura principal no intuito de fixar a estrutura principal à parede, aumentando assim a rigidez da estrutura. A sucção de ar é promovida por um ventilador centrífugo, através da tubulação de material plástico flexível de 100 mm de diâmetro. O sistema contém um rotâmetro para verificação da vazão de ar no sistema. Entre a tubulação lateral e o sistema de sucção, foi instalado um sistema de filtragem para impedir que o material aspirado do interior da torre atinja o sistema de sucção e seja lançado à atmosfera. A bancada de ensaios montada e instalada com todos os seus componentes é mostrada na Figura 3.17.



a) Inversor de frequência; b) Ventilador centrífugo; c) Rotâmetro; d) Filtro; e) Moega de armazenamento; f) Torre de poeira; g) Tubulação lateral de sucção; h) Contador de partículas; i) Reservatório.

**Figura 3.17 – Torre de poeira do Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados (UFPA).  
Fonte: Autoria própria, 2018.**

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 (Figura 3.18a), com um lençol de vedação entre eles 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 3.18b). O material a ser ensaiado, contido na moega, é descarregado através da torre de poeira por uma entrada circular de 80 mm de diâmetro (Figura 3.19a). Uma contracorrente de ar (de baixo para cima), no sentido contrário ao escoamento do material, arrasta as partículas mais finas em direção a tubulação lateral da bancada, na qual está instalado o tubo coletor, acoplado ao contador de partículas. A Figura 3.19b destaca a entrada da tubulação lateral.



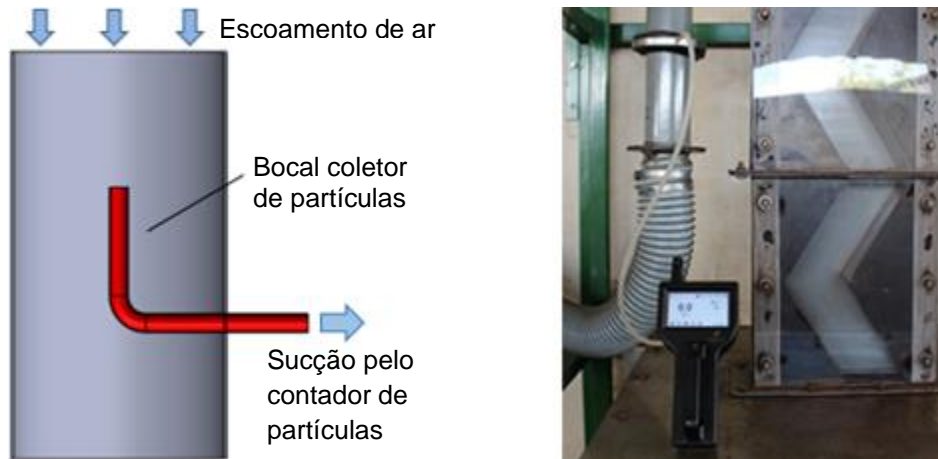
**Figura 3.18 – a) Detalhe do canal interno da torre de poeira; b) Módulos da torre de poeira montados (4 partes).  
Fonte: Autoria própria, 2018.**



**Figura 3.19 – a) Entrada superior da torre de poeira, para alimentação da amostra de ensaio; b) Entrada da tubulação lateral de sucção.  
Fonte: Autoria própria, 2018.**

As partículas de poeira que são carregadas pelo escoamento de ar, entram na tubulação lateral de sucção e são direcionadas até um tubo em “L”, de 4 mm de diâmetro interno, o qual está acoplado ao contador de partículas modelo *Particles Plus* 8306, por meio de uma mangueira lisa, flexível e transparente, conforme mostrado na Figura 3.20.





**Figura 3.20 – a) Mecanismo de coleta de partículas; b) contador de partículas instalado na tubulação lateral da torre de poeira.**

**Fonte: Autoria própria, 2018.**

### 3.2.2. Descrição da Bancada

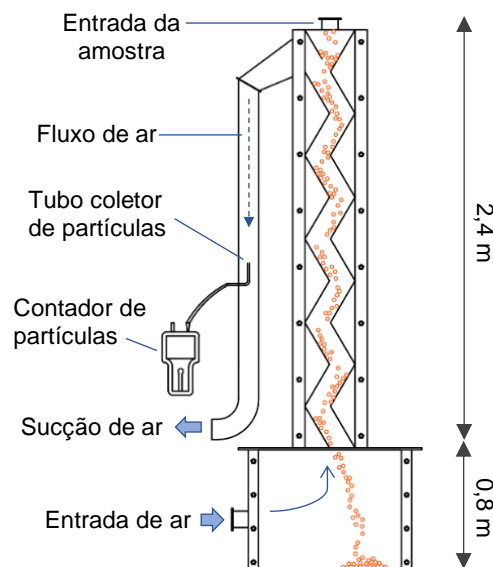
O procedimento de ensaio em torre de poeira foi desenvolvido de forma similar ao procedimento de testes de Copeland e Kawatra (2011), o qual é descrito nos passos a seguir:

- i. O procedimento inicia-se com o preparo de 3 kg de material à umidade desejada, utilizando a mesma metodologia de preparo de amostra utilizada nos ensaios em túnel de vento (Para testes com pelotas, deve-se selecionar as pelotas com bons aspectos – não quebradiças).
- ii. Nos testes com supressores de poeira, a aplicação do supressor é feita em um recipiente cilíndrico, girando-o lentamente, enquanto a solução supressora é pulverizada sobre o material (Figura 3.21), conforme descrito por Copeland e Kawatra (2011);
- iii. Em seguida, o material é levado à moega e o sistema de elevação é suspenso;
- iv. Os módulos da torre de poeira são montados e fixados com parafusos entre os flanges dos componentes para vedação do sistema;
- v. O sistema de sucção é acionado e com o auxílio do inversor de frequência, regula-se vazão. O valor da vazão varia conforme a característica física do material (massa específica, esfericidade, etc.), dessa forma, deve-se realizar

uma avaliação em uma faixa de vazão, para definir aquela capaz de capturar as partículas de interesse.

- vi. 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 2 s, para medir a concentração de partículas no ambiente e estabelecer uma linha de referência (background);
- vii. A válvula rotativa é então acionada, liberando 1 kg de material;
- viii. O contador mantém-se ligado até que os valores medidos se aproximem do valor de referência inicial (aproximadamente 35 segundos);
- ix. Com os 2 kg de material restantes na moega, outros dois ensaios são realizados, ou seja, 1kg por ensaio (triplicata);
- x. Após o teste, as amostras testadas armazenadas no reservatório são removidas para análise posterior e a torre de poeira é limpa

A concentração, dosagem e tempo de cura do supressor é definido conforme o escopo do teste e tipo de supressor, sendo possível utilizar a própria metodologia de testes em torre de poeira, para avaliar os efeitos desses parâmetros. A Figura 3.22 apresenta um desenho esquemático do teste em torre de poeira.



**Figura 3.21 – Desenho esquemático da bancada de ensaios – Torre de poeira.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**



### 3.3. Incertezas experimentais nos testes em bancadas

Em qualquer experimento realizado, incertezas sempre estão presentes, sejam elas sistemáticas ou aleatórias. No entanto, a existência de incertezas implica em confiança na validade do resultado de uma medição, pois o resultado de uma medição é uma estimativa ou aproximação do valor da mensurado e só poderá ser considerado completo quando acompanhado da indicação de uma incerteza. A confusão entre o conceito de erro e incerteza é muito comum, sendo importante distinguir suas diferenças. O erro é a diferença entre o resultado real e o mensurado de uma determinada medição, sendo, portanto, um conceito idealizado, pois conhecer o valor do erro, implicaria em se conhecer o verdadeiro valor de uma medição. A incerteza, por outro lado, representa uma gama de valores (distribuição), e se avaliada por um procedimento analítico e para um dado tipo de amostra, pode aplicar-se a todas as determinações descritas dessa forma. As incertezas podem ser classificadas em dois grupos, uma componente aleatória (Tipo A) e uma componente sistemática (Tipo B). A incerteza do Tipo A resulta de uma determinação baseada em análise estatística de uma série repetida de observações, medidas em condições idênticas, em que o desvio-padrão, é utilizado como uma medida da dispersão dos valores, para avaliação de proximidade à normalidade (média aritmética). A incerteza sistemática, resulta de métodos de cálculo não estatísticos, sendo baseada em conceitos científicos e independente do número de medições, logo não se reduz com o aumento das medições. Além disso, se a incerteza sistemática é frequente, a incerteza aleatória está sempre presente (MOREIRAS, 2005).

A quantidade de variáveis em processos reais, os afetam significativamente e a compreensão de como elas se propagam é fundamental para o planejamento de experimentos, uma vez que ao minimizá-las, obtêm-se dados mais confiáveis. Na maioria dos casos, um resultado experimental não é medido diretamente, e sim determinado a partir de um certo número de grandezas de entrada  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), de acordo com a relação funcional  $R = R(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n)$ . Algumas dessas variáveis estão sob o controle direto do experimento e outras de forma indireta, algumas são observadas, mas não controladas e algumas nem mesmo são observadas (MOFFAT, 1988). A incerteza sistemática, é conhecida também por “incerteza padrão combinada”, pois resulta da combinação das incertezas padrão dos

componentes de entrada, tendo um caráter de desvio padrão para esse tipo de incerteza, e correspondendo à uma incerteza-padrão de estimativa da grandeza de saída,  $R$ . A Equação 3.4 é utilizada para estimar a incerteza sistemática de  $R$ , denotada por  $\delta R$ , com boa precisão para a maioria das funções de engenharia. Cada termo da equação, representa a contribuição da incerteza em uma variável, para a incerteza geral no resultado, sendo representados da mesma forma, com uma derivada parcial de  $R$ , em relação à  $x_i$ , multiplicada pelo intervalo de incerteza para aquela variável ( $\delta x_i$ ). Essas derivadas parciais são chamadas de coeficientes de sensibilidade (MOFFAT, 1988).

$$\delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \delta x_n\right)^2} \quad (3.4)$$

Para as duas bancadas de testes, a análise de incertezas é realizada para cálculo de umidade do material (Equação 3.1) e da perda de massa total de material em túnel de vento (Equação 3.2). Para a torre de poeira, as grandezas avaliadas, como o número de partículas serão feitas diretamente do contador de partículas, além da umidade do material que já está sendo avaliado nesta seção. A Tabela 3.1 apresenta a incerteza de cada grandeza avaliada, bem como suas variáveis primárias e coeficientes de sensibilidade. O intervalo de incerteza para cada variável é a sensibilidade do instrumento de medição utilizado para medir aquela variável, e os valores de incertezas são apresentados nos resultados desse trabalho e seus apêndices. As incertezas aleatórias não são abordadas nesse trabalho, devido ao pequeno número de repetições planejadas para os ensaios, devido à disponibilidade de tempo e material para testes.

**Tabela 3.1 – Incertezas sistemáticas avaliadas nos testes em bancadas.**

| Equação                     | $R$ | $x_1$ | $x_2$ | $\partial R / \partial x_1$ | $\partial R / \partial x_2$ | $\delta R$  |
|-----------------------------|-----|-------|-------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| $U = \frac{M_u - M_s}{M_u}$ | $U$ | $M_u$ | $M_s$ | $\frac{M_s}{M_u^2}$         | $-\frac{1}{M_u}$            | $\sqrt{\left(\frac{M_s}{M_u^2} \delta M_u\right)^2 + \left(-\frac{1}{M_u} \delta M_s\right)^2}$ |
| $P = 1 - \frac{M_f}{M_i}$   | $P$ | $M_i$ | $M_f$ | $\frac{M_f}{M_i^2}$         | $-\frac{1}{M_i}$            | $\sqrt{\left(\frac{M_f}{M_i^2} \delta M_i\right)^2 + \left(-\frac{1}{M_i} \delta M_f\right)^2}$ |

**Fonte: Autoria própria, 2018.**

## 4. CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS

Para comissionamento das bancadas desenvolvidas e validação das metodologias de testes, amostras de minério de ferro, pelotas e carvão foram utilizados. As amostras de minério de ferro e pelotas foram fornecidas pelo Centro de Tecnologia de Ferrosos – Vale (CTF), oriundos da mina de Vargem Grande em Minas Gerais. Os finos de minério são do tipo *Pellet feed* Moído e Prensado (PFM) e *Pellet feed* Natural (PFN). Finos de pelotas obtidas do processo de tamboramento (geração de finos da pelota através da movimentação e sucessivos impactos das pelotas no interior de um tambor rotativo) também foram fornecidas pelo CTF. As amostras de carvão foram obtidas da mina de carvão da Vale em Moatize (Moçambique), sendo uma de Carvão Coqueificável (CCM) e outra de Carvão Térmico (CTM). As amostras foram recebidas em tambores de 200 litros, adequadamente protegidas contra contaminações externas.

A caracterização é um processo comum de avaliação das características físicas do material, e neste trabalho tem como objetivo também a levantar os parâmetros que influenciam na geração de poeira de cada material. A caracterização das amostras foi realizada a partir de uma coletânea de metodologias experimentais que visam determinar os aspectos físicos das amostras, tais como: granulometria, esfericidade, massa específica e massa específica aparente em função da umidade do material. Nesse capítulo são apresentadas as metodologias experimentais de ensaios de caracterização para cada um desses parâmetros.

### 4.1. Granulometria

A distribuição de tamanhos das partículas é um dos parâmetros fundamentais para se entender a característica de um material granular. A técnica mais usual utilizada é o peneiramento. No entanto, essa técnica possui limitações para a medição de particulados superfinos, dessa forma, técnicas mais avançadas que utilizam difração a laser, são capazes de avaliar milhares de partículas, num pequeno intervalo

de tempo, sendo ainda mais precisos que o peneiramento na medição das partículas relacionadas à emissão de particulados.

#### 4.1.1. Peneiramento

A determinação da distribuição granulométrica das amostras é realizada através de peneiramento a seco, conforme procedimentos descritos na norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). O ensaio inicia-se pela avaliação visual das maiores partículas contidas nas amostras, no intuito de se estabelecer a massa mínima de amostra necessária para realização do ensaio, conforme mostrado na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Massa mínima, por amostra de ensaio, para peneiramento.**

| Dimensão máxima nominal do agregado (mm) | Massa mínima seca da amostra de ensaio (kg) |
|--|---|
| < 4,75                                   | 0,3   |
| 9,5                                      | 1   |
| 12,5                                     | 2   |
| 19,0                                     | 5   |
| 25,0                                     | 10  |
| 37,5                                     | 15  |
| 50,0                                     | 20  |
| 63,0                                     | 35  |
| 75,0                                     | 60  |
| 90,0                                     | 100   |
| 100,0                                    | 150   |
| 125,0                                    | 300   |

**Fonte: ABNT, 2003**

Após a escolha da massa mínima da amostra, o material é separado em bandejas e levado ao forno para secagem a temperatura de  $105 \pm 5$  °C, por no mínimo 24 h. Com o material seco e à temperatura ambiente, inicia-se o peneiramento. O peneiramento é feito por meio de uma peneira vibratória (Figura 4.1), com uma amplitude de vibração de 1 mm durante 15 min. Os produtos retidos nas peneiras são pesados utilizando uma balança BK5000 com capacidade máxima de 5000 g e resolução de 0,01 g, determinando-se então sua porcentagem em relação à massa

inicial. Considerando que nenhuma das amostras avaliadas nesse trabalho possuem granulometria maior que 50  $\mu\text{m}$ , e que o intuito do trabalho é caracterizar a faixa de granulometria associada à emissão de particulado, a qual encontra-se abaixo do menor valor da Tabela 4.1, definiu-se que a maior dimensão da peneira seria 50  $\mu\text{m}$ , e peneiras abaixo de 4,75  $\mu\text{m}$  disponíveis no laboratório foram utilizadas (3,35; 2,0; 1,0; 0,6; 0,425; 0,250; 0,125; 0,053; 0,045; 0,020  $\mu\text{m}$ ).



**Figura 4.1 – Peneira vibratória.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

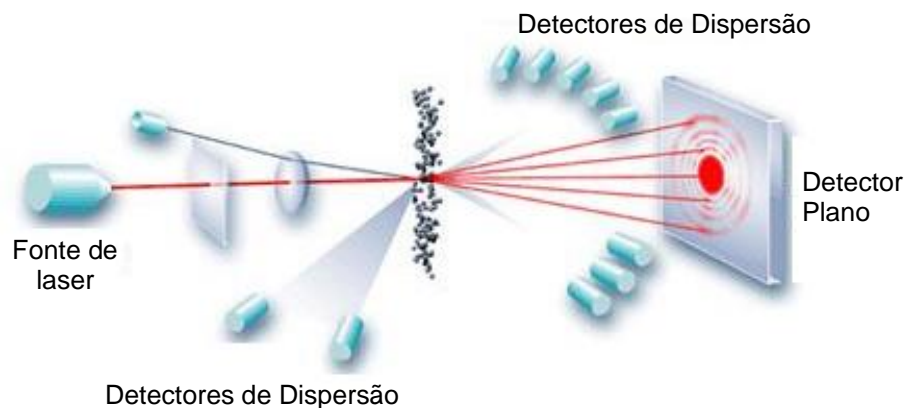
#### **4.1.2. Difração a laser**

Para determinação da distribuição de tamanho das partículas ultrafinas das amostras ( $< 10 \mu\text{m}$ ), utilizou-se o equipamento *Malvern Mastersizer 2000* (Figura 4.2), do Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) da Universidade de São Paulo (USP), o qual utiliza a técnica de espalhamento de luz laser de baixo ângulo (LALLS - *Low Angle Laser Light Scattering*). Este método de análise de tamanho de partículas, também conhecido como difração a laser, consiste na medição dos ângulos de difração do raio laser, que são relacionados ao diâmetro da partícula (SAMPAIO et al., 2007). A difração laser mede as distribuições de tamanho das partículas por medição da variação angular na intensidade da luz difundida à medida que um feixe de laser interage com as partículas dispersas da amostra. Durante a incidência do laser, as partículas passam por um feixe focalizado e dispersam a luz a um ângulo que é inversamente proporcional a seu tamanho. A posição angular da intensidade da luz espalhada é então medida por uma série de detectores fotossensíveis, caracterizando

um sistema de dispersão. A Figura 4.3 ilustra o sistema de dispersão a laser (GUTIERREZ, 2009).



**Figura 4.2 – Equipamento de difração a laser.**  
**Fonte: Malvern Panalytical, 2018.**



**Figura 4.3 - Sistema de dispersão a laser.**  
**Fonte: Gutierrez, 2009.**

## 4.2. Esfericidade

A determinação da esfericidade das amostras é realizada por meio de duas técnicas: permeamtria e análise de imagem dinâmica. A seguir são apresentadas as metodologias experimentais de cada técnica. Os ensaios de permeamtria foram realizados pelo Laboratório de Fenômenos de Transporte e Físico-química de Interfaces (LFQI) da Escola Politécnica de São Paulo (EPUSP), enquanto os ensaios com análise de imagem dinâmica foram feitos pelo LCT – USP.

#### 4.2.1. Permeametria

A primeira técnica utilizada para determinar a forma das partículas é feita experimentalmente através do parâmetro de esfericidade, utilizando-se a permeametria, conforme descrito por Souza Pinto et al. (2009). O fator de esfericidade ( $\Psi$ ) é calculado através da Equação 4.1.

$$\Psi = 12,25 \sqrt{\frac{\kappa (1 - \varepsilon)^3}{\bar{D}_s^2 \varepsilon^2}} \quad (4.1)$$

Sendo:  $\Psi$  – Esfericidade (adimensional);  $\kappa$  – Permeabilidade do leito de partículas ( $m^2$ );  $\bar{D}_s$  – Diâmetro de Sauter médio das partículas (m);  $\varepsilon$  – Porosidade do leito de partículas (adimensional).

O diâmetro de Sauter é definido por meio da Equação 4.2.

$$\bar{D}_s = \frac{1}{\sum_{n=1}^i \left( \frac{x_n}{D_n} \right)} \quad (4.2)$$

Sendo:  $\bar{D}_n = \frac{D_{n-1} + D_n}{2}$ ;  $x_n$  – Fração de massa retida na abertura da peneira  $n$ ;  $D_n$  – Diâmetro de abertura da peneira  $n$ ;  $D_{n-1}$  – Diâmetro de abertura da peneira  $n-1$ ;

A porosidade, por sua vez é calculada através da Equação 4.3.

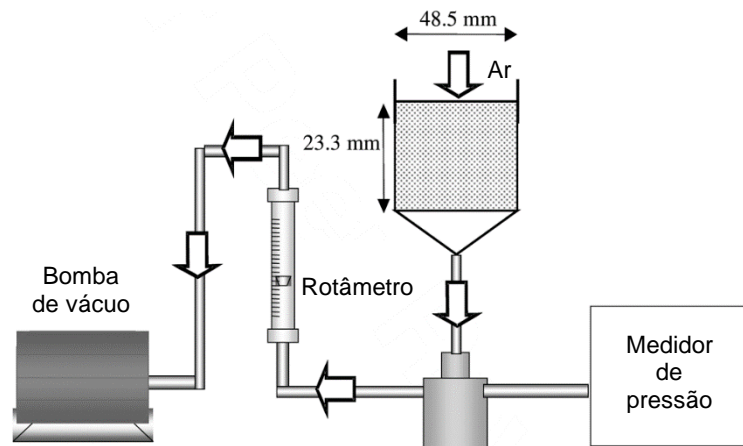
$$(1 - \varepsilon) = \frac{M_s}{\rho_s Vol} \quad (4.3)$$

Sendo:  $M_s$  - massa de sólidos que preenche o leito de partículas (kg);  $\rho_s$  - massa específica das partículas sólidas das partículas sólidas ( $kg/m^3$ );  $Vol$  - volume do leito de partículas ( $m^3$ ).

A permeabilidade ( $k$ ) do leito de partículas grossas, médias e finas de cada minério é determinada através da lei de Darcy (Equação 4.4), utilizando-se o aparato experimental mostrado na Figura 4.4.

$$\frac{-\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k} * \frac{Q}{A} \quad (4.4)$$

Sendo:  $\mu$  - viscosidade dinâmica do ar (Pa.s);  $Q$  - vazão de ar (m<sup>3</sup>/s);  $A$  - área da seção transversal do leito de partículas (m<sup>2</sup>);  $\Delta P$  - queda de pressão (Pa);  $L$  - Espessura do leito de partículas (m).



**Figura 4.4 – Aparato experimental para determinação da permeabilidade de leito de partículas.**

**Fonte: Souza Pinto et al., 2009.**

O procedimento de ensaio baseia-se em introduzir as amostras no funil de área  $A$  e altura  $L$ . Um fluxo de ar com vazão ( $Q$ ) conhecida passa através do leito de partículas, e então, mede-se a queda de pressão ( $\Delta P$ ) ao longo desse leito através de um manômetro em “U” preenchido com água. A magnitude de  $\Delta P$  é dividida pelo comprimento ( $L$ ) do leito de partículas, calculando-se  $\frac{-\Delta P}{L}$ . Quando a percolação do ar através do leito de partículas ocorre em regime laminar, então,  $\frac{-\Delta P}{L}$  aumentará linearmente com o aumento da vazão do ar ( $Q$ ) e o coeficiente angular da reta ( $\frac{\mu}{kA}$ ) pode ser determinado. Conhecendo-se o coeficiente angular da reta, determina-se a magnitude da permeabilidade ( $k$ ) do leito de partículas que, em conjunto com sua porosidade ( $\epsilon$ ), calcula-se a esfericidade ( $\psi$ ).



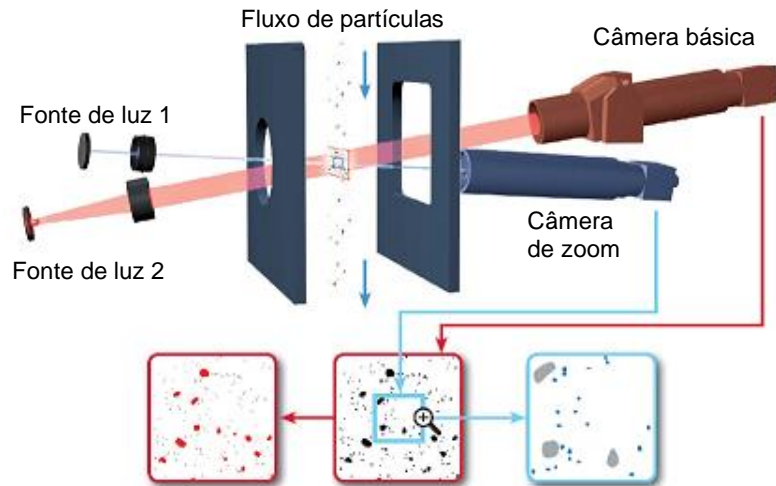
#### 4.2.2. Análise de imagem dinâmica

A análise de imagem dinâmica foi realizada com o equipamento da marca Retsch, modelo Camsizer XT (Figura 4.5) em acessório X-Flow, mediante dispersão em água deionizada e aplicação de ultrassom por 1 minuto, segundo procedimento descrito pela norma ISO 13322-2/2006. O módulo X-Flow recircula as suspensões líquidas e pode aplicar ultrassom para dispersar os aglomerados. A dispersão necessária para desaglomerar a amostra sem quebrar as partículas individuais, garantindo que a medição não contabilize nenhuma partícula aglomerada.



**Figura 4.5 – Aparato de análise de imagem dinâmica – CAMSIZER.  
Fonte: Retsch Technology, 2018.**

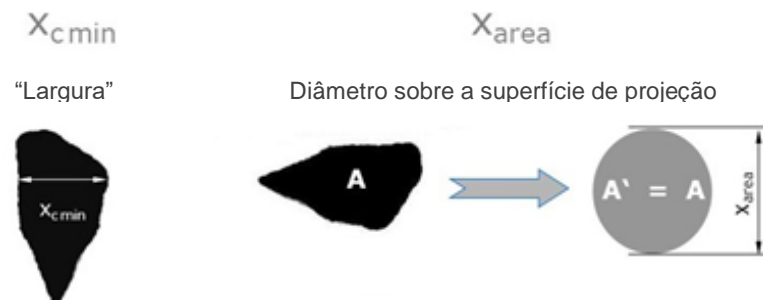
O CAMSIZER usa o princípio de processamento de imagem digital, em que as partículas dispersas passam na frente de duas fontes de luz de LED pulsadas e brilhantes. As sombras das partículas são capturadas com duas câmeras digitais. Uma câmera é otimizada para analisar as partículas pequenas com alta resolução (câmera de zoom), enquanto a outra câmera é usada para detectar grandes partículas com boas estatísticas (câmera básica), o que significa um amplo campo de visão. Cada câmera é iluminada por um LED com brilho, comprimento de pulso e campo de visão otimizados (Figura 4.6). Um software analisa o tamanho e a forma de cada partícula e, finalmente, calcula as respectivas curvas de distribuição em tempo real (RETSCH TECHNOLOGY, 2018).



**Figura 4.6 – Princípio de medição pelo CAMSIZER**  
**Fonte: Retsch Technology, 2018.**

Devido ao alto conteúdo de informação obtido das imagens digitais medidas e armazenadas, as projeções de partículas podem ser avaliadas de várias maneiras. Dependendo da aplicação, o CAMSIZER mede várias áreas, perímetros e comprimentos das projeções de partículas. Como a esfericidade é uma propriedade teórica da amostra, seu valor pode variar consideravelmente dependendo da forma em que as medições são interpretadas. Matai et al. (2016) determinam as esfericidades em relação a dois parâmetros, conforme mostrado na Figura 4.7:

- $X_{c\ min}$ : representa a largura da partícula como sendo o menor valor entre os diâmetros máximos para múltiplas orientações de medida;
- $X_{area}$ : representa o diâmetro da partícula como sendo o diâmetro de um círculo de área equivalente.



**Figura 4.7 – Parâmetros de avaliação da esfericidade via CAMSIZER.**  
**Fonte: Retsch Technology, 2018.**

Os resultados da forma das partículas são combinados automaticamente utilizando a proporção em massa dos produtos.

### 4.3. Massa específica

A massa específica ( $\rho_s$ ) dos granéis de minério de ferro e carvão também foram feitas pelo LFQI – EPUSP, por meio do método de picnometria. Um picnômetro consiste, basicamente, num balão de vidro com fundo chato, com volume variando de 25 a 250 ml ou mais, dependendo da sua aplicação, equipado com uma rolha também de vidro, através da qual passa um canal capilar. A massa específica do material sólido é então calculada através da Equação 4.5.

$$\rho_s = \frac{(A_2) + (A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)} \quad (4.5)$$

Sendo:

$\rho_s$  – massa específica do sólido;

$A_1$  – massa do picnômetro (obtida no procedimento (i));

$A_2$  – massa do picnômetro + amostra;

$A_3$  – massa do picnômetro + amostra + água;

$A_4$  – massa do picnômetro + água;

O procedimento de ensaio segue as seguintes etapas (SAMPAIO et al., 2007):

- i. Pesar o picnômetro vazio, previamente limpo e seco, em estufa, a 100°C e resfriado em dessecador;
- ii. Encher o picnômetro com água até transbordar, secar a água que molha a superfície externa do mesmo e, em seguida, pesar o picnômetro com água;
- iii. A diferença entre os pesos do picnômetro com água e sem água é a massa de água utilizada. Sabendo o volume de água colocada no picnômetro pode-se determinar a massa específica da água ou de outro líquido utilizado;
- iv. Adiciona-se a amostra de sólido no picnômetro e, em seguida, pesa-se todo o conjunto, obtendo-se o valor de  $A_2$ . A massa da amostra é determinada pela diferença entre a massa do picnômetro com sólido e sem sólido (vazio), informação obtida no item (i).

- v. A massa de água adicionada ao picnômetro com amostra é determinada pela diferença entre a massa do picnômetro com sólido e água ( $A_3$ ) e a massa do picnômetro com sólido ( $A_2$ );
- vi. O volume de água adicionado é obtido pela relação entre a massa específica da água (obtida em iii) e a massa de água adicionada no picnômetro (obtida em v);
- vii. O volume do sólido é determinado pela diferença entre o volume total do picnômetro e o volume de água adicionada (obtida em vi);
- viii. A massa específica da amostra é obtida pela relação entre a massa de sólido (obtida em iv) e o volume do sólido (obtido em vii);
- ix. Pesar e anotar a massa.

A determinação da massa específica de um mineral por meio da técnica do picnômetro exige também uma balança de precisão, com, no mínimo, duas casas decimais. Para assegurar que o procedimento foi utilizado corretamente, recomenda-se a dos ensaios em duplicata.

#### **4.3.1. Determinação da massa específica aparente em função da umidade**

No intuito de avaliar a influência da umidade nas amostras de minério e carvão, a determinação da massa específica aparente ( $\rho_a$ ) em função da umidade do material é realizada por meio do preenchimento de um cilindro cerâmico de volume  $1000 \text{ cm}^3 \pm 0,3 \text{ cm}^3$  (Figura 4.10a) com material a uma determinada umidade. Os passos a seguir apresentam a metodologia utilizada nos ensaios:

- i. Pesagem da massa do cilindro vazio (tara);
- ii. Preparo da amostra de material úmido, a uma determinada umidade – Mistura da massa de material seco e massa de água;
- iii. Coleta de uma amostra para verificação/validação da umidade ensaiada;
- iv. Preenchimento do cilindro por camadas com material úmido, para evitar pontos de vazios no interior do cilindro;

- v. Com o auxílio de um raspador, o material em excesso ao volume do cilindro é removido (Figura 4.10b);



**Figura 4.8 – Recipiente utilizado para medição da massa específica aparente.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

- vi. Pesagem do cilindro + material úmido;
- vii. O material é então retirado do cilindro, o qual é limpo para retirar material remanescente;
- viii. Uma nova amostra é então preparada a uma umidade 1% acima da anterior e o processo de i-vii, é repetido;
- ix. O ensaio inicia-se com a umidade mínima de 1% e finaliza-se após o valor máximo da curva ser atingido, quando é observado saturação de água do material no interior do cilindro.
- x. Com os valores das massas obtidos em cada umidade e com o volume conhecido, determina-se a massa específica aparente do material, através da Equação 4.6.

$$\rho_a = \frac{\text{Massa de material úmido}}{\text{Volume do cilindro}} = \frac{M_u}{V_c} \quad (4.6)$$

### 4.3.2. Incertezas experimentais na caracterização das amostras

Utilizando o mesmo método de análise das incertezas sistemáticas apresentadas no item 3.3 deste trabalho, os parâmetros de caracterização das amostras são apresentados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 – Incertezas sistemáticas na caracterização das amostras.**

| Equação                    | $R$      | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $\partial R/\partial x_1$ | $\partial R/\partial x_2$ | $\delta R$  |
|----------------------------|----------|-------|-------|-------|---------------------------|---------------------------|---|
| $\rho_a = \frac{M_u}{V_c}$ | $\rho_a$ | $M_u$ | $V_c$ | -     | $\frac{1}{V_c}$           | $-\frac{M_u}{V_c^2}$      | $\sqrt{\left(\frac{1}{V_c} \delta M_u\right)^2 + \left(-\frac{M_u}{V_c^2} \delta V_c\right)^2}$ |

**Fonte: Autoria própria, 2018.**

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização, arrasto eólico em túnel de vento e emissão de particulados em torre de poeira. Todas as cinco amostras de graneis foram caracterizadas, mas somente os minérios de ferro tipo *pellet feed* foram ensaiados em túnel de vento, devido à baixa disponibilidade de material, enquanto nos ensaios em torre de poeira todos os materiais foram avaliados.

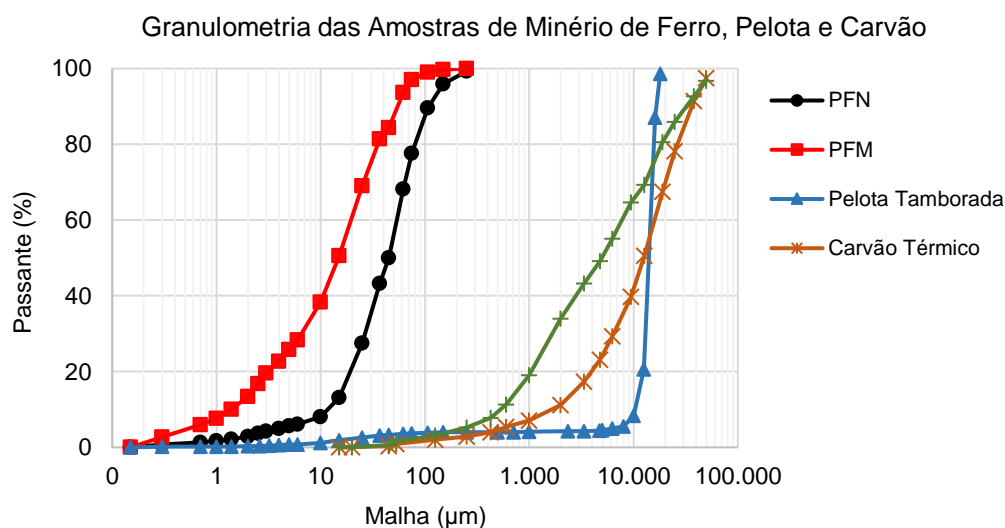
### 5.1. Caracterização das amostras

#### 5.1.1. Granulometria

Nesse trabalho, o peneiramento foi realizando somente para as amostras de carvão, uma vez que o Centro de Tecnologia de Ferrosos – Vale (CTF) forneceu a distribuição granulométrica das amostras de minério de ferro e pelota tamborada, inclusive para faixas granulométricas menores que a de 20  $\mu\text{m}$ , disponíveis no FLUIDPAR. Após a avaliação visual, definiu-se que a massa mínima de carvão a ser utilizada seria 20 kg, para cada ensaio, conforme a maior partícula observada na amostra.

A Figura 5.1 apresenta a distribuição de tamanho de partículas passante acumuladas dos granéis de minério de ferro, carvão e pelota tamborada. Comparando os dois pellets feed, observa-se que o *pellet feed* moído e prensado (PFM) possui uma quantidade maior de finos, os quais são considerados como aqueles materiais passantes em 45  $\mu\text{m}$  para o estudo de material particulado. O *pellet feed* natural (PFN) apresenta 50,08% de finos, enquanto o PFM, apresenta 84,33%. Considerando o material passante em 10  $\mu\text{m}$ , o *pellet feed* natural apresenta 8,09% de finos, e o *pellet feed* moído e prensado apresenta 38,3%. Além disso, os resultados mostram que os finos da pelota apresentam uma distribuição mais regular, com a maior parte das suas partículas sendo maiores que 12,5mm, e possui uma porcentagem de finos (< 45  $\mu\text{m}$ ) menor que os *pellet feeds*, apenas 3,23%. A distribuição de tamanho de partículas do

carvão coqueificável e carvão térmico também são apresentadas na Figura 5.1. O carvão coqueificável apresenta uma porcentagem maior de finos, 0,57%, comparado ao carvão térmico que apresenta 0,27 %. Nota-se também que as duas amostras de carvão possuem mais partículas maiores que 1 mm, em relação às amostras de minério de ferro.



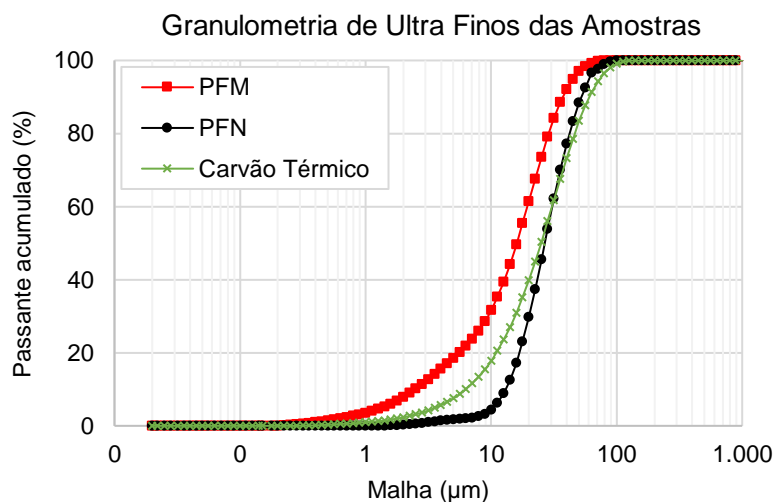
**Figura 5.1 – Distribuição de tamanho de partículas passante acumulado de minério de ferro e carvão.**

**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Devido a limitação de tamanho de peneira disponíveis, o menor diâmetro de partícula avaliado no peneiramento do carvão é de 20 µm. No entanto, como os ensaios em torre de poeira avaliam a geração de particulados menores que 10 µm, os resultados da distribuição de tamanho das partículas ultrafinas pela análise de difração a laser, realizados pelo LCT – USP, são utilizados para garantir maior confiabilidade nas análises. A Figura 5.2 apresenta a distribuição de tamanho de partículas ultrafinas, para as duas amostras de *pellet feed* e para o carvão térmico. Comparando os dois minérios de ferro tipo pellet, nota-se que o PFM apresenta uma porcentagem de partículas menores que 10 µm muito superior ao PFN, sendo, respectivamente, iguais a 31,7% e 4,37%, confirmando os resultados obtidos pelo processo de peneiramento. A partir desses resultados, é esperado que a quantidade de particulados gerados para o PFM seja muito superior ao PFN, uma vez que ele possui quantidades maiores de particulados inferior ao diâmetro de partícula analisado pelo contador de partículas (10 µm). A amostra de carvão térmico apresentou 17,8 % de partículas inferiores a 10 µm. Devido a limitação de amostras, não há resultados



disponíveis para frações de carvão coqueificável. Os resultados de granulometria para todas as amostras caracterizadas estão disponíveis no APÊNDICE B.



**Figura 5.2 – Distribuição de tamanho de partículas ultra-finas.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

### 5.1.2. Esfericidade

A Tabela 5.1 compara a esfericidade calculada pelo método de permeamtria, com as esfericidades ponderadas encontradas pela análise de imagem dinâmica (CAMSIZER), a qual faz uma comparação entre as esfericidades calculadas através dos parâmetros  $X_{c\ min}$  e  $X_{area}$ , para várias faixas de tamanho de partículas. Para as amostras de carvão, foi possível apenas obter esfericidade através deste método para a fração de finos (<1mm) maiores que 150  $\mu\text{m}$ . Isto devido ao fato de os resultados do CAMSIZER para as amostras de carvão possuírem uma resolução que limitou de tamanho de partícula à no mínimo de 75  $\mu\text{m}$ . Outro fato notável para as amostras de carvão é a ausência de resultados para algumas granulometrias das amostras de carvão utilizando a metodologia de permeamtria, devido a insuficiência de amostra representativa após o peneiramento, o que impossibilitou a medição da esfericidade. Baseado nos valores obtidos em cada um dos métodos, é notável que não há uma correlação direta que permita a comparação dos fatores de esfericidade entre os dois métodos. Esse fato pode ser decorrente de uma série de fatores relacionados as condições admitidas em cada uma das metodologias. Um ponto notável de

discrepância está no fato da esfericidade do método CAMSIZER ser calculada a partir de uma correlação de área e perímetro, ou seja, baseada apenas em medições bidimensionais por tratamento de imagens. Por outro lado, a esfericidade calculada através da permeamtria é obtida por uma análise tridimensional, uma vez que ela considera fatores volumétricos em seu modelo (Diâmetro de Sauter e densidade das partículas). As análises de CAMSIZER seguem uma tendência decrescente com relação ao tamanho de partícula em praticamente todas as metodologias de análise e tipos de amostra, enquanto as medições por permeamtria parecem não seguir um padrão coeso, de modo que cada amostra apresenta uma tendência diferente. Nota-se também que as medições através do método CAMSIZER apresentam um valor de esfericidade maior do que os obtidos através da permeamtria, na totalidade dos casos.

**Tabela 5.1 – Esfericidades via CAMSIZER e permeamtria das amostras.**

| Material                      | Método      | +150 $\mu\text{m}$ | -150 $\mu\text{m}$<br>+44 $\mu\text{m}$ | -44 $\mu\text{m}$<br>+20 $\mu\text{m}$ | -20 $\mu\text{m}$ |
|-------------------------------|-------------|--------------------|---|--|-------------------|
| <i>Pellet feed</i><br>Natural | Xc min      | 0,902              | 0,896                                   | 0,877                                  | 0,792             |
|                               | Xarea       | 0,755              | 0,874                                   | 0,849                                  | 0,778             |
|                               | Permeamtria | 0,084              | 0,220                                   | 0,348                                  | 0,450             |
| <i>Pellet feed</i><br>Moído   | Xc min      | 0,917              | 0,901                                   | 0,733                                  | 0,789             |
|                               | Xarea       | 0,837              | 0,866                                   | 0,824                                  | 0,785             |
|                               | Permeamtria | 0,29               | 0,383                                   | 0,820                                  | -                 |
| Carvão<br>Coqueificável       | Xc min      | 0,776              | -                                       | -                                      | -                 |
|                               | Xarea       | 0,762              | -                                       | -                                      | -                 |
|                               | Permeamtria | 0,451              | 0,481                                   | -                                      | 0,762             |
| Carvão<br>Térmico             | Xc min      | 0,769              | -                                       | -                                      | -                 |
|                               | Xarea       | 0,753              | -                                       | -                                      | -                 |
|                               | Permeamtria | 0,747              | 0,572                                   | -                                      | -                 |

**Fonte: Autoria própria, 2018.**

### 5.1.3. Massa Específica

Os resultados dos testes de massa específica via picnometria para as amostras de minério de ferro e carvão são apresentados na Tabela 5.2. É importante notar a ausência da medição de densidade em algumas frações. Esse fato, em todos casos, também é consequência de insuficiência de amostra representativa após o peneiramento. Entre os minérios de ferro tipo *pellet feed*, o *pellet feed* moído possui massa específica ligeiramente menor que o *pellet feed* natural, nas faixas de tamanhos menores que 150  $\mu\text{m}$ . Para as amostras de carvão, o carvão térmico apresentou massa específica ligeiramente superior ao carvão coqueificável, em ambas as faixas de tamanhos em que há resultados. Os resultados também apresentam a significativa diferença entre a massa específica do minério de ferro e do carvão, sendo este último muito mais leve e, conseqüentemente, mais propenso à emissão de material particulado na atmosfera.

**Tabela 5.2 – Massa específica obtida via picnometria, em  $\text{g}/\text{cm}^3$ .**

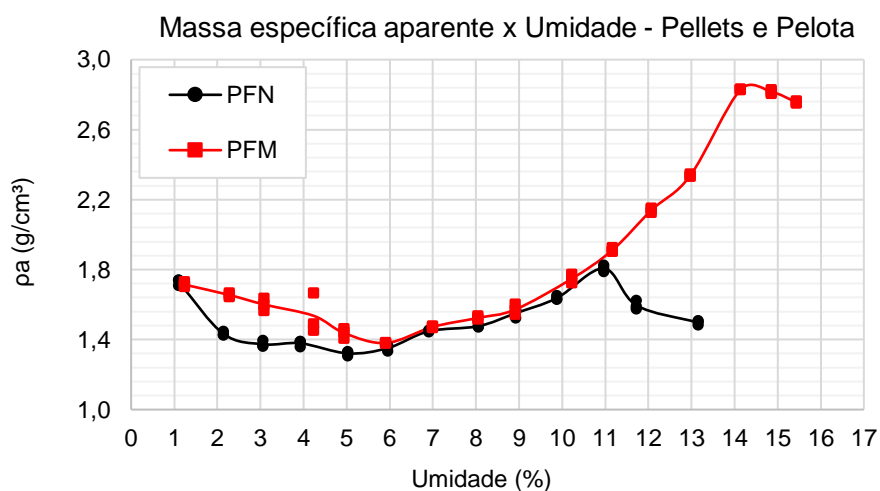
| Material                   | +150 $\mu\text{m}$ | -150 $\mu\text{m}$<br>+44 $\mu\text{m}$ | -44 $\mu\text{m}$<br>+20 $\mu\text{m}$ | -20 $\mu\text{m}$ | Média |
|----------------------------|--------------------|---|--|-------------------|-------|
| <i>Pellet feed</i> natural | 4,13               | 4,78                                    | 4,77                                   | 4,92              | 4,65  |
| <i>Pellet feed</i> moído   | 4,03               | 4,81                                    | 4,71                                   | 4,49              | 4,51  |
| Carvão coqueificável       | 1,35               | 1,33                                    | -                                      | 1,33              | 1,34  |
| Carvão térmico             | 1,44               | 1,44                                    | -                                      | -                 | 1,44  |

Fonte: Autoria própria, 2018.

### 5.1.4. Massa específica aparente em função da umidade

A Figura 5.3 apresenta as curvas de massa específica aparente ( $\rho_a$ ) em função da umidade do material ( $U$ ), obtidas para o *pellet feed* natural (PFN) e *pellet feed* moído e prensado (PFM). Para o PFN, observa-se que a zona de água capilar é localizada entre as umidades de 5% e 11%, no qual encontra-se os estados pendular, funicular e capilar. Entre 0 e 5%, tem-se a zona de água adsorvida e acima de 11% é observado o início de água livre no material, caracterizando o começo do estado de

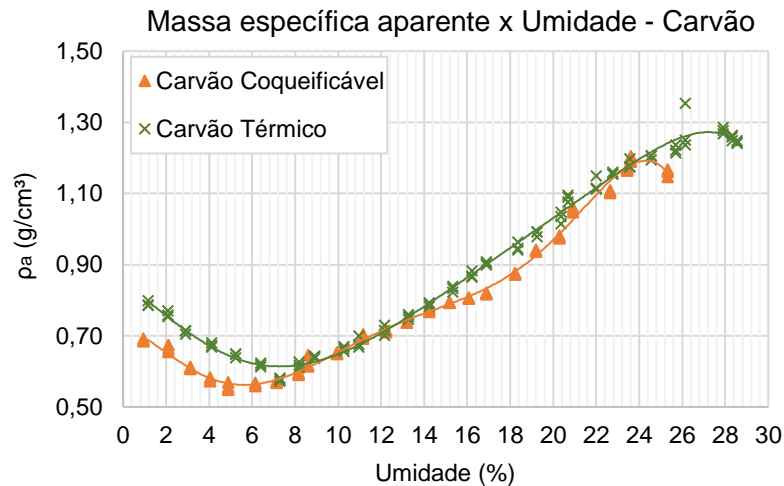
polpa. No PFM, a região de água capilar é observada entre as umidades de 6 e 14%. Dessa forma, os resultados mostram que, em um material com maior porcentagem de finos, como é o caso do PFM, a região de água capilar é maior.



**Figura 5.3 – Massa específica aparente em função da umidade – *Pellet feed*.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

As amostras de carvão têm suas curvas de massa específica aparente ( $\rho$ ) em função da umidade ( $U$ ), apresentadas na Figura 5.4. A zona de água capilar para o carvão térmico é observada entre as umidades de 7% e 27%. Para o carvão coqueificável, a região capilar é observada para as umidades entre 5% e 24%. Os resultados para as amostras de carvão são bastante similares para os limites de umidade da região capilar, o que pode ser explicado pelo fato de ambas as amostras possuírem quantidade de partículas mais finas similares.

As incertezas sistemáticas calculadas tanto para este ensaio de caracterização estão disponíveis no APÊNDICE C. Os valores são muito próximos para todos os materiais, com uma incerteza de  $\pm 0,00052 \text{ g/cm}^3$ .



**Figura 5.4 – Massa específica aparente em função da umidade – carvão.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

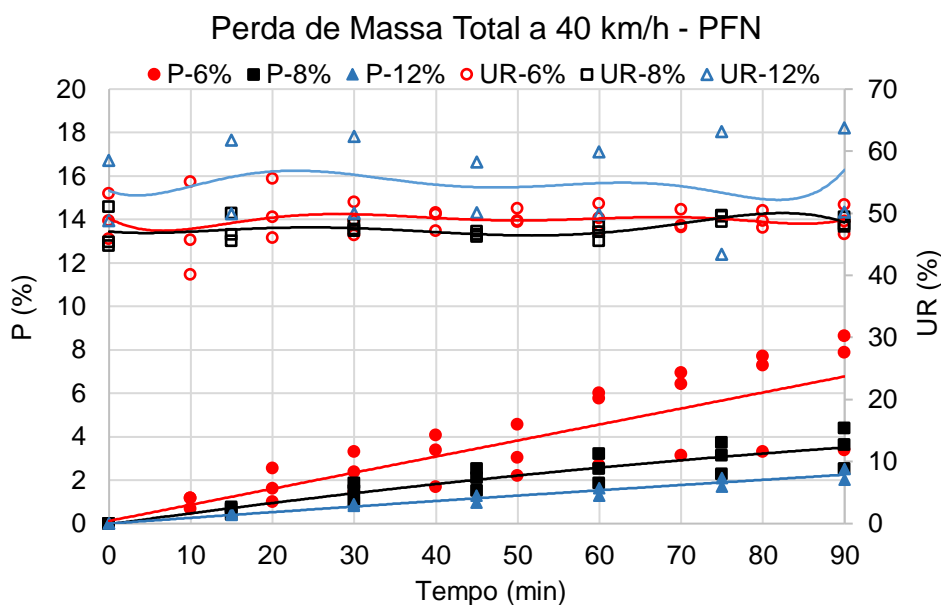
## 5.2. Ensaio em Túnel de Vento

Considerando que as composições ferroviárias que transportam minério de ferro na EFVM, em geral, possuem velocidades na faixa de 40 km/h a 70 km/h. Nesse trabalho, são consideradas essas duas velocidades (mínima e máxima) para a velocidade de escoamento do ar no túnel de vento. Essas velocidades não foram escalonadas juntamente com o modelo de vagão, uma vez que nenhuma análise de similaridade foi realizada neste trabalho, devido à restrição de se escalonar as partículas de material.

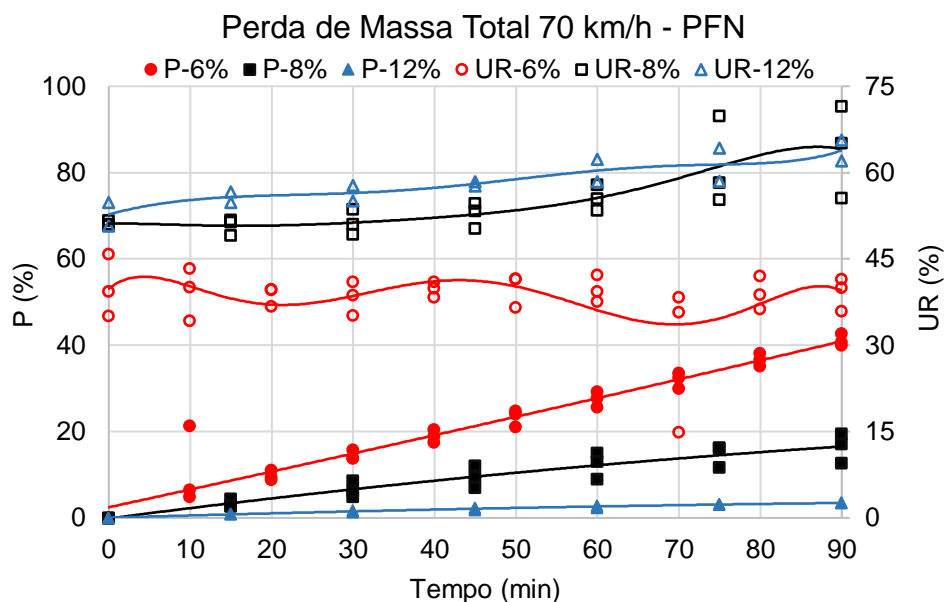
### 5.2.1. Perda de massa em modelo de vagão

Foram realizados ensaios em túnel de vento com os minérios de ferro *pellet feed* natural (PFN) e *pellet feed* moído e prensado (PFM), para as velocidades de 40 km/h e 70 km/h. Inicialmente, avaliou-se o efeito somente da água como supressor de emissão de particulados, para os valores de umidades de 6%, 8% e 12%, para ambos os minérios de ferro, uma vez que essa é a faixa da zona capilar encontrada para o PFN, mantendo-se assim a mesma faixa de umidade para comparação dos dois materiais.

A Figura 5.5 e a Figura 5.6 apresentam os resultados de perda de massa total ( $P$ ) de *pellet feed* natural, respectivamente, para as velocidades de 40 km/h e 70 km/h. Ambos os resultados apresentam uma clara influência na redução da emissão de particulados com o aumento da umidade de 6 a 12%. No entanto, nota-se que perda de massa é muito mais significativa quando a velocidade do escoamento é de 70 km/h, mostrando que o aumento da pressão exercida pelo escoamento com o aumento da velocidade, resulta em uma maior perda de massa. É importante ressaltar a influência da umidade relativa do ar na emissão de particulados. Durante os experimentos com a velocidade do ar de 70 km/h, ocorreu uma coincidência. Ao diminuir a umidade da amostra, a umidade relativa do ar, a qual não é controlada, também diminuiu, sendo muito mais baixa para a umidade de 6% em relação aos valores para as umidades de 8% e 12%. Estes dois fatores se somam, resultando em um aumento da perda de massa, que chegou a 40% ao término do ensaio com 6% de umidade. Dessa forma, é provável que se a umidade relativa do ar para os ensaios de 6% umidade fosse similar aos valores dos ensaios das umidades de 8% e 12%, a perda de massa com o material a menor umidade fosse menor do que o obtido nos testes, porém ainda maior quando comparado aos testes com as outras duas umidades.



**Figura 5.5 – Perda de massa total à velocidade de 40 km/h – *Pellet feed* natural.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

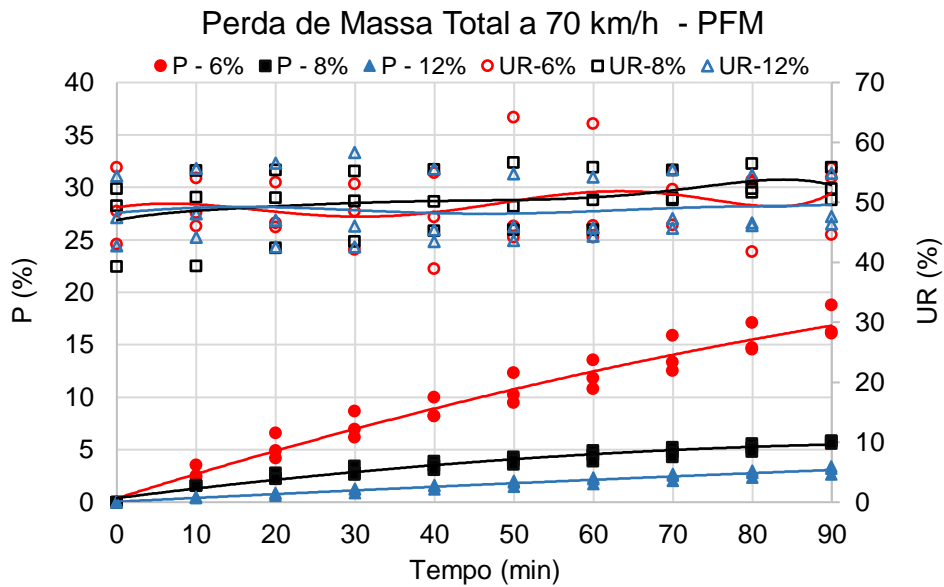


**Figura 5.6 – Perda de massa total à velocidade de 70 km/h – *Pellet feed* natural.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Os resultados de arrasto eólico obtidos nos ensaios com o *pellet feed* moído e prensado, para as velocidades de 40 km/h e 70 km/h são apresentados, respectivamente, na Figura 5.7 e na Figura 5.8. A perda de massa para os testes realizados com a velocidade de 40 km/h foi menor para 6% de umidade, em relação ao PFN, mesmo sendo realizado em condições de umidade relativa do ar um pouco menor, mostrando o efeito da coesão causada pela força capilar. Entretanto, para 12% de umidade, o PFN perdeu 2% de massa (umidade relativa do ar durante o experimento variou entre 54% e 65%) contra 14% de perda de massa para o PFM (umidade relativa do ar variou entre 48% e 40%). Nesse caso, o efeito da diferença na umidade relativa do ar foi maior do que a força capilar, sendo provavelmente porque o PFM secou mais rapidamente. Observa-se também que a perda de massa do PFM para a umidade de 12% foi menor que para a umidade de 8%. Isso pode estar relacionado ao fato que a umidade relativa do ar para os experimentos a 12% de umidade foi maior, em relação a 8% de umidade. Sob o mesmo valor de umidade relativa do ar, espera-se que a perda de massa a 12% fosse menor que a 8%, mostrando a importância de realizar os experimentos sob condições ambientes controladas. Para a velocidade do ar de 70 km/h, a umidade relativa do ar manteve-se equilibrada para as três umidades. Nesse caso, a perda de massa foi maior, em relação à velocidade de 40 km/h, para todas três umidades (6%, 8% e 12%).



**Figura 5.7 – Perda de massa total à velocidade de 40 km/h – Pellet feed moído e prensado.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**



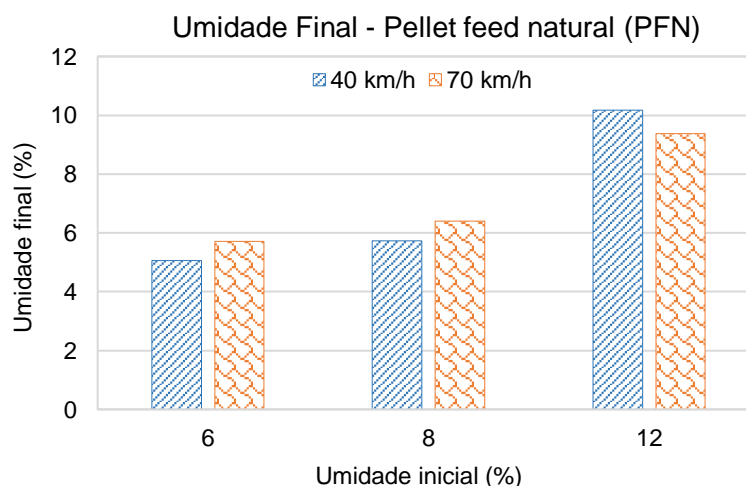
**Figura 5.8 – Perda de massa total à velocidade de 70 km/h – Pellet feed moído e prensado.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

As incertezas sistemáticas de perda de massa total para o PFN e PFM, em ambas as velocidades de ensaio são similares ( $\pm 0,11\%$ ), em média, para os três ensaios realizados. Todos os resultados de perda de massa total são apresentados no APÊNDICE D.



### 5.2.2. Mecanismo de secagem do material

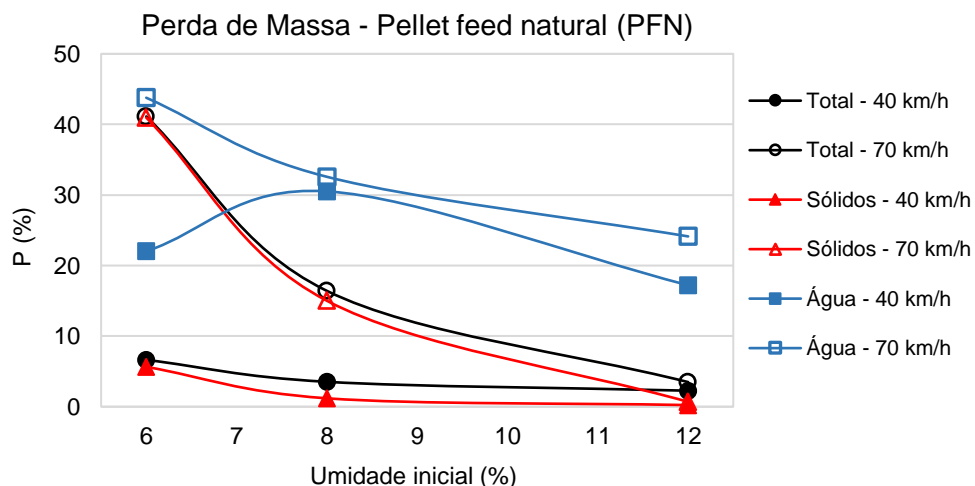
A Figura 5.9 apresenta os valores obtidos das umidades finais de todo o material remanescente no modelo de vagão, para o PFN apenas, nos testes com umidades de 6%, 8% e 12%. Os resultados mostram que os valores de umidade final do PFN, para a velocidade de 70 km/h, foram menores que os resultados obtidos para a velocidade de 40 km/h, para a umidade de 12%, ou seja, para uma maior velocidade do escoamento houve uma secagem global maior do material. No entanto, para as umidades de 6% e 8%, a umidade final para a velocidade de 70 km/h foi maior do que a umidade final obtida para a velocidade de 40 km/h. A falta de tendência dos resultados entre as três umidades de referência pode ser devido ao fato que, nas umidades mais baixas, há uma maior perda de material úmido que na umidade de 12%, uma vez que o gráfico avalia somente a perda de umidade. Outra possibilidade é devido à variação de umidade relativa do ar durante os experimentos, os quais influenciam significativamente nos resultados dos experimentos.



**Figura 5.9 – Umidade final do PFN em modelos de vagão.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Para um melhor entendimento do mecanismo de secagem, e com a informação da umidade final do material ao término do ensaio mostradas na Figura 5.9, é possível avaliar a perda de massa tanto de minério seco (sólidos) quanto de água evaporada. A Figura 5.10 mostra a perda de massa de água, massa total e massa de sólidos, em função da umidade inicial para as velocidades de ar de 40 e 70

km/h. Percebe-se que o aumento da velocidade proporciona o aumento na perda de massa de cada elemento individualmente. Além disso, com o aumento da umidade, a perda de massa em todos os casos diminui, exceto para a perda de água com velocidade do ar de 40 km/h, que diminui quando a umidade passa de 8% para 6%. Pode-se notar também que, para ambas as velocidades do ar, as perdas proporcionais de água são maiores do que as perdas de sólidos, mostrando que o processo de emissão de particulados envolve a secagem do minério. A perda de massa de sólidos foi mínima, respectivamente, 0,23% e 0,69% para as velocidades do vento de 40 km/h e 70 km/h, quando a umidade inicial foi de 12%, enquanto para a umidade inicial de 8%, ocorreu uma perda de massa de sólidos em proporções muito maiores, sendo 1,2% para velocidade do vento de 40 km/h e 15% para velocidade do vento de 70 km/h. Além disso, a redução de perda de massa de água a 40 km/h, quando a umidade é reduzida de 8% para 6%, pode estar associado à transição entre a zona de água capilar, que no caso do PFN, ocorre a 5 % de umidade. Após este ponto e até um percentual de umidade ligeiramente acima deste, a água estará no estado funicular. Neste caso a água está ligada às partículas sólidas pela força capilar. Esta ligação físico-química entre a água e as partículas sólidas pode explicar a queda na taxa de secagem observada para 6% de umidade, embora os efeitos de umidade relativa do ar podem ter grande influência nos resultados. Portanto, a realização de ensaios em condições ambientes controladas é necessária para uma melhor análise do mecanismo de secagem em modelo de vagão.



**Figura 5.10 – Perda de massas do PFN em função da velocidade do ar.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

A avaliação de umidade do minério através da estratificação e coleta de amostras em camadas do material no modelo de vagão são apresentadas na Tabela 5.3 e na Tabela 5.4, respectivamente, para as umidades iniciais de 8% e 12% do PFN. Para esta avaliação não foi considerado a umidade inicial de 6%, haja visto que a perda de material na superfície do modelo vagão não permite a padronização da metodologia, pois compromete a primeira camada. Os resultados obtidos mostram que há uma diminuição gradual e significativa no valor de umidade das amostras coletadas em cada camada, conforme a camada se aproxime da superfície do material exposta ao escoamento, para os quatro cenários avaliados. Este comportamento é um forte indicador do processo de secagem do leito de material contido no modelo de vagão, iniciando pela camada mais exposta ao escoamento e, conseqüentemente, evaporando a água contida nas camadas inferiores, a qual deve migrar por capilaridade para as camadas da superfície e, posteriormente, é evaporada.

**Tabela 5.3 – Umidade estratificada do PFN em modelo de vagão a 8% de umidade.**

| Velocidade | Camada | Seção I | Seção II | Seção III | Seção IV | Seção V |
|------------|--------|---------|----------|-----------|----------|---------|
| 40km/h     | 1      | 4,90%   | 4,66%    | 4,60%     | 4,50%    | 4,88%   |
|            | 2      | 5,91%   | 5,93%    | 6,07%     | 5,98%    | 5,96%   |
|            | 3      | 6,72%   | 6,50%    | 6,44%     | 6,52%    | 6,64%   |
|            | 4      | 6,84%   | 6,83%    | 6,77%     | 6,72%    | 6,90%   |
|            | 5      | 7,03%   | 7,18%    | 7,12%     | 7,08%    | 7,14%   |
|            | 6      | 7,19%   | 7,21%    | 7,16%     | 7,13%    | 7,22%   |
| Velocidade | Camada | Seção I | Seção II | Seção III | Seção IV | Seção V |
| 70km/h     | 1      | 5,60%   | 5,61%    | 4,71%     | 4,72%    | 4,88%   |
|            | 2      | 6,53%   | 6,39%    | 6,30%     | 6,20%    | 6,05%   |
|            | 3      | 6,88%   | 6,75%    | 6,70%     | 6,55%    | 6,64%   |
|            | 4      | 7,13%   | 6,86%    | 6,78%     | 6,71%    | 6,75%   |
|            | 5      | 7,18%   | 7,01%    | 6,93%     | 6,74%    | 7,07%   |
|            | 6      | 7,22%   | 7,04%    | 6,99%     | 6,87%    | 7,10%   |

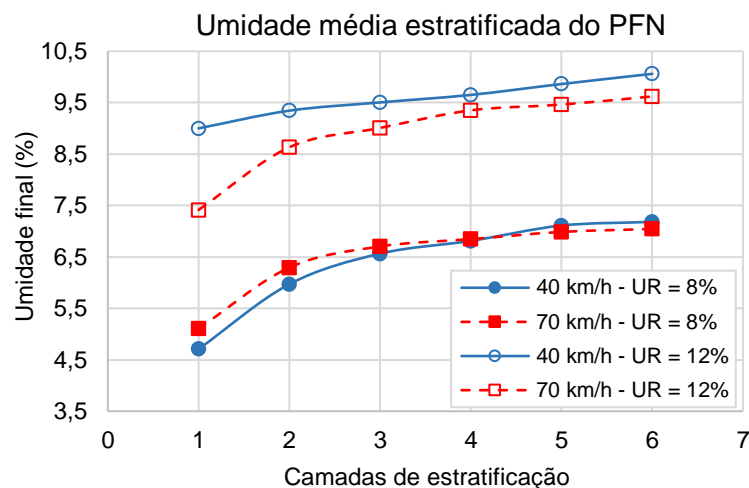
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

**Tabela 5.4 – Umidade estratificada do PFN em modelo de vagão a 12% de umidade.**

| Velocidade | Camada | Seção I | Seção II | Seção III | Seção IV | Seção V |
|------------|--------|---------|----------|-----------|----------|---------|
| 40km/h     | 1      | 8,62%   | 8,95%    | 8,91%     | 9,33%    | 9,19%   |
|            | 2      | 9,55%   | 9,09%    | 9,07%     | 9,54%    | 9,47%   |
|            | 3      | 9,66%   | 9,32%    | 9,38%     | 9,60%    | 9,56%   |
|            | 4      | 9,83%   | 9,51%    | 9,54%     | 9,73%    | 9,64%   |
|            | 5      | 10,66%  | 9,57%    | 9,58%     | 9,77%    | 9,73%   |
|            | 6      | 10,72%  | 9,89%    | 9,85%     | 9,90%    | 9,94%   |
| Velocidade | Camada | Seção I | Seção II | Seção III | Seção IV | Seção V |
| 70km/h     | 1      | 7,28%   | 7,85%    | 7,14%     | 6,54%    | 8,26%   |
|            | 2      | 7,39%   | 8,54%    | 8,88%     | 8,73%    | 9,62%   |
|            | 3      | 8,76%   | 8,60%    | 9,10%     | 8,93%    | 9,65%   |
|            | 4      | 9,11%   | 9,32%    | 9,45%     | 9,09%    | 9,78%   |
|            | 5      | 9,17%   | 9,37%    | 9,67%     | 9,17%    | 9,93%   |
|            | 6      | 9,33%   | 9,62%    | 9,79%     | 9,31%    | 10,05%  |

**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Os resultados de umidade final estratificada mostram que para a umidade inicial de 12%, a umidade do material é menor ao longo das camadas para a velocidade de 70 km/h, o que pode ser facilmente visualizado na Figura 5.11, que mostra a umidade média por camada em função da sua profundidade. Como resultado, a umidade média no final do experimento foi de 10,06% para a velocidade do vento de 40 km/h e 9,62 % para 70 km/h. Para a umidade inicial de 8%, as camadas próximas à superfície exposta ao escoamento apresentam maior umidade final para a velocidade de 70 km/h e ligeiramente menor nas camadas mais profundas, resultando em uma umidade média final de 7,18% e 7,04%, para velocidades do vento de 40 km/h e 70 km/h, respectivamente. Portanto, pode-se observar que com o aumento da velocidade de escoamento do ar, a taxa de secagem aumenta.



**Figura 5.11. Umidade final média estratificada do *Pellet feed* natural.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

### 5.2.3. Efeito de produtos químicos na supressão de poeira

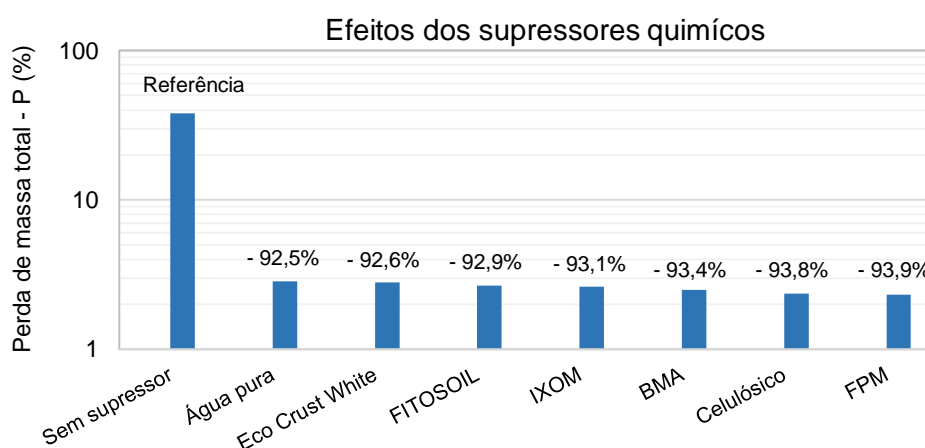
A técnica experimental em túnel de vento também é aplicável à avaliação da performance de diferentes supressores. Diante disso, a Vale forneceu alguns dos supressores mais utilizados em cobertura pilhas de estocagem e de carga de vagões de trem no Sistema Sudestes. A Tabela 5.5 apresenta esses supressores, com suas respectivas concentrações (em massa), em solução aquosa, dos produtos à base de polímeros. O reagente a base de celulose foi recebido com sua solução final misturada e possui aplicação. Além dos seis produtos fornecidos pela Vale, também foi avaliado a aplicação de água pura somente, além do cenário sem nenhum supressor aplicado.

**Tabela 5.5 – Supressores de particulado utilizados no Sistema Sudeste da Vale.**

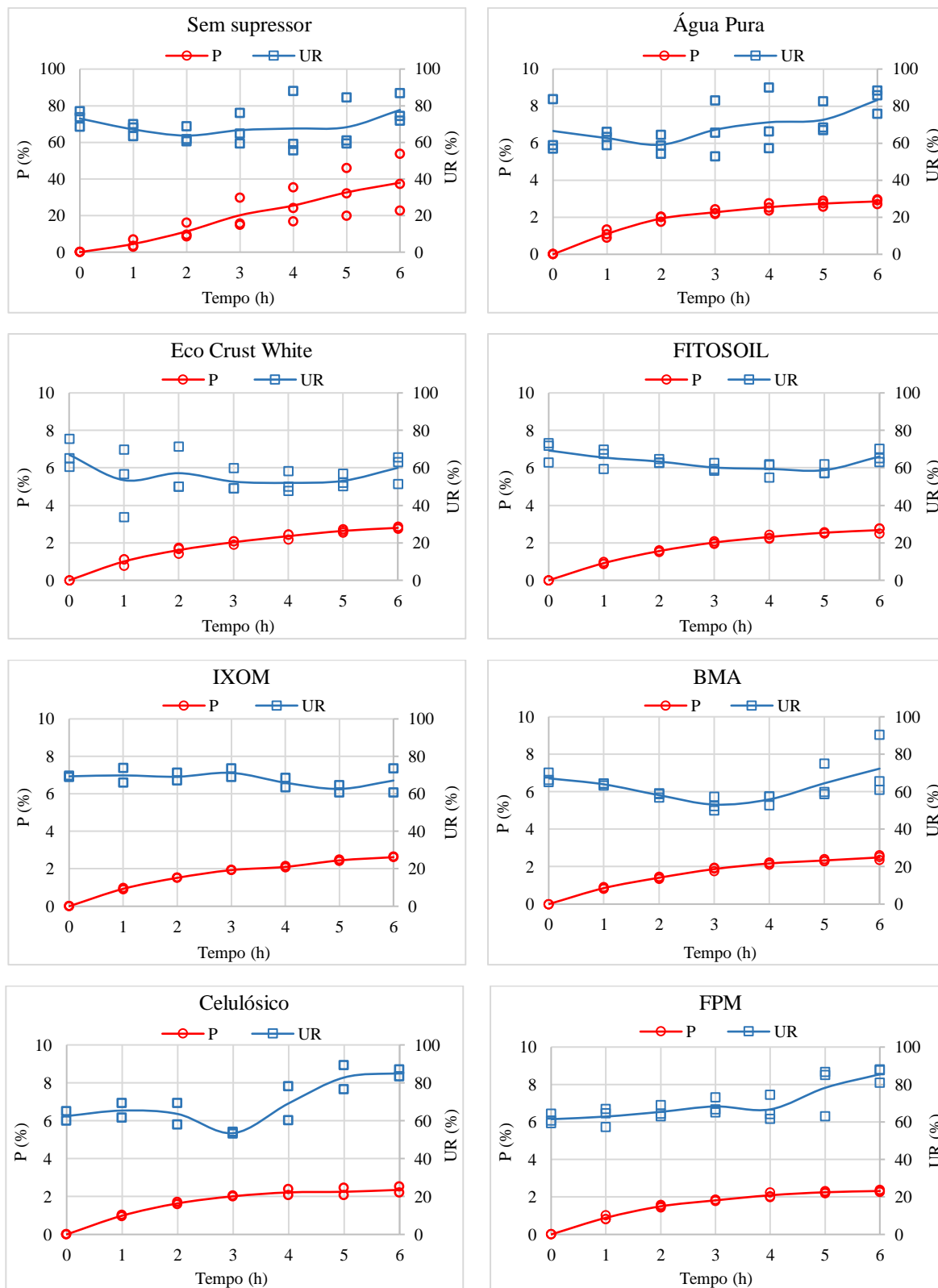
| <b>Produto</b>         | <b>Concentração (g/g)</b> |
|------------------------|---------------------------|
| Sem supressor          | -                         |
| Água pura              | Aplicação Direta          |
| Celulósico             | Aplicação Direta          |
| <i>Eco Crust White</i> | 2,50%                     |
| IXOM                   | 0,50%                     |
| BMA                    | 2,00%                     |
| FITOSOIL               | 1,30%                     |
| FPM                    | 0,50%                     |

**Fonte: Autoria própria, 2018.**

A Figura 5.12 apresenta os valores médios de perda de massa total ao término do ensaio. Tomando o caso “Sem Supressor” como referência, podemos perceber que os percentuais de redução de perda de massa total para os outros sete produtos foram bastante similares. O FPM apresentou-se como o produto de melhor desempenho, com uma redução de 93,9% na perda de massa, em relação ao caso sem supressor. Outra informação importante é o desempenho da água pura, que proporcionou uma redução de 92,5%, em relação ao caso sem supressor. Isso mostra que o uso da água tem um efeito similar aos de produtos químicos comerciais. Apesar de nenhum dos produtos químicos avaliados, terem mostrados desempenho melhor que o simples uso de água, mais ensaios devem ser realizados, testando condições mais severas, tais como alta temperatura e baixa umidade relativa do ar, e durante um maior período de tempo, em diferentes dosagens dos produtos, para avaliar o seu desempenho em condições mais críticas. A Figura 5.13 apresenta os resultados de todos os oito casos avaliados. Para os ensaios sem a aplicação de supressor, observou-se a maior perda de massa entre todos os casos avaliados, 40% (aproximadamente), o que já era esperado. Para as demais situações, a perda de massa total observada apresentou comportamento similar entre si, com perda de massa na ordem de 2,3%. A maioria dos ensaios teve valores de umidades relativas do ar similares, na faixa de 60 a 70%, embora algumas discrepâncias podem ser observadas devido a ocorrências de chuvas durante algum momento do ensaio. A avaliação do supressor também foi feita de forma visual, através do aspecto físico da superfície do material, e podem ser consultadas no APÊNDICE E, juntamente com os resultados de perda de massa total.



**Figura 5.12 – Desempenho dos supressores químicos de cobertura.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**



**Figura 5.13 – Perda de massa total ( $P$ ) e umidade relativa do ar ( $UR$ ) dos ensaios de arrasto eólico com a aplicação de produtos químicos de cobertura.**

**Fonte: Autoria própria, 2018.**

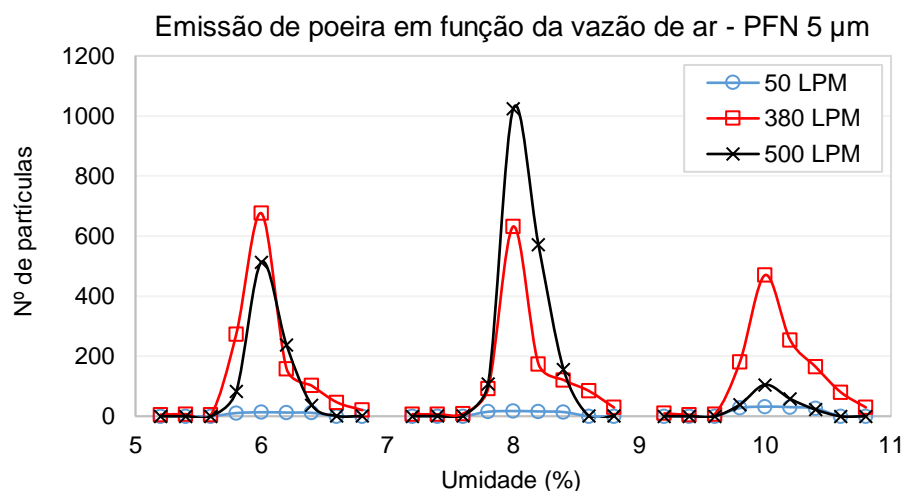
### 5.3. Ensaio em Torre de Poeira

O comissionamento da bancada torre de poeira, bem como a validação da metodologia de teste foi realizada com os dois finos de minério de ferro (PFN e PFM) e com as amostras de carvão, inicialmente apenas avaliando a variação de umidade de cada material, e posteriormente avaliando-se a aplicação de agentes supressores.

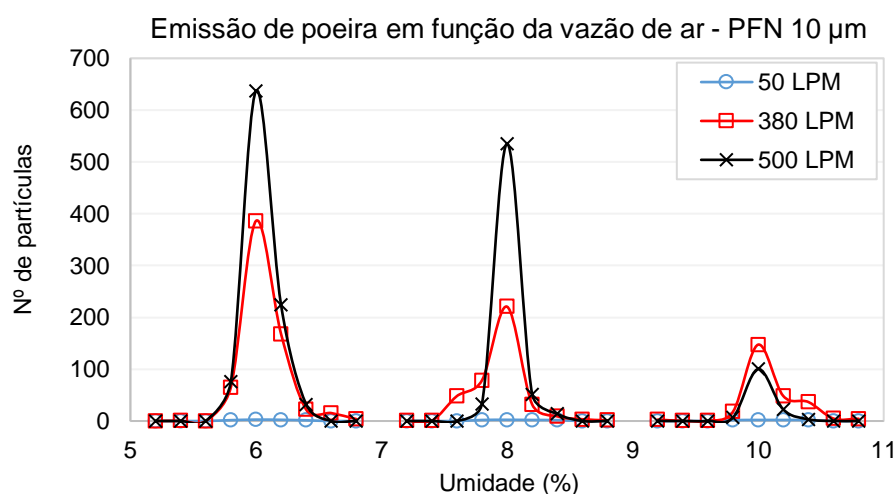
#### 5.3.1. Vazão de ensaio na torre de poeira

A vazão de ar no interior da torre de poeira não está claramente evidenciada nas referências utilizadas como base desse projeto da bancada, sendo encontrados valores entre 4,25 e 500 LPM (litros por minuto). Diante disso, foi necessário definir a vazão padrão de ensaio, avaliando-se a emissão de particulado do *pellet feed* natural (PFN) nas umidades de 6%, 8% e 10%, em diferentes valores de vazões, entre os limites mínimo (50 LPM) e máximo (500 LPM) de leitura do rotâmetro instalado no sistema. A Figura 5.14 e a Figura 5.15, apresentam os resultados obtidos para as vazões avaliadas, respectivamente, para o diâmetro de partícula de 5  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ . Os resultados mostram que para a menor vazão (50 LPM), a velocidade de captura das partículas no interior da torre de poeira não é suficiente para carregar as partículas de poeira até o contato de partículas. Para a vazão de 500 LPM, apesar de ser suficiente para capturar as partículas em suspensão, observa-se um comportamento as partículas de 5  $\mu\text{m}$  de diâmetro, com o aumento no número de partículas com o aumento da umidade de 6% para 8%, o qual é esperado que diminua. Algumas outras vazões foram avaliadas e, para a vazão de 380 LPM, observou-se que o comportamento das emissões medidas foi satisfatório, uma vez que o número de partículas, para ambos os diâmetros analisados, é representativo além de ocorrer também a redução gradual no número de partículas geradas com o aumento da umidade.





**Figura 5.14 – Influência da vazão de ar na torre de poeira para partículas de 5  $\mu\text{m}$ .  
Fonte: Autoria própria, 2018.**

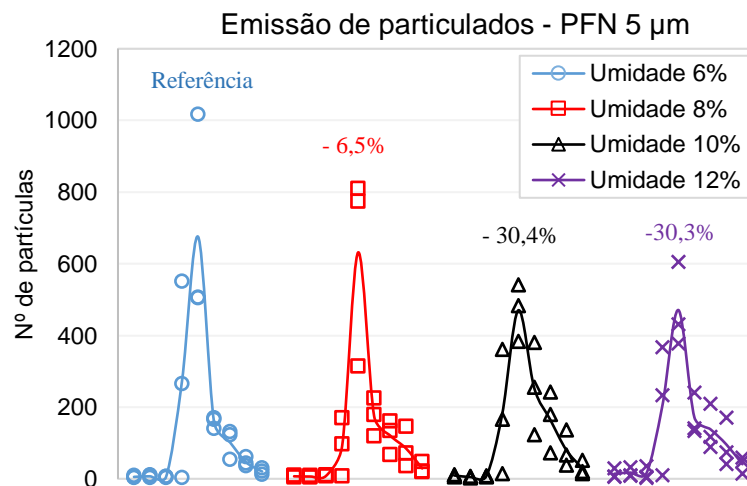


**Figura 5.15 – Influência da vazão de ar na torre de poeira para partículas de 10  $\mu\text{m}$ .  
Fonte: Autoria própria, 2018.**

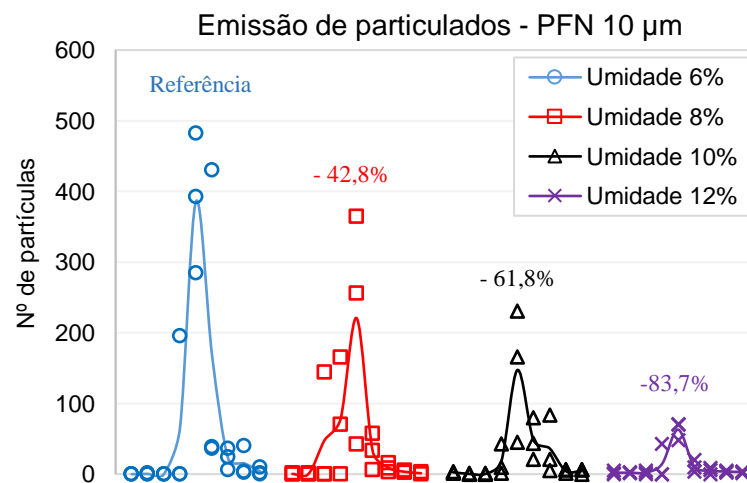
### 5.3.2. Efeito da água na supressão de particulados em torre de poeira

O primeiro método para supressão da emissão de poeira avaliado na torre de poeira foi a utilização somente de água, na forma do aumento da umidade do material. Os resultados foram obtidos para partículas de 5 e 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro para os minérios de ferro a 6%, 8%, 10% e 12% de umidade, mantendo-se a mesma faixa de umidade utilizada nos testes em túnel de vento, e para as amostras de carvão, a faixa de umidade foi de 3%, 6% e 9%, pois são as faixas de umidade que esses materiais são manuseados em Moatize. A Figura 5.16 e a Figura 5.17 apresentam os resultados

obtidos para o *pellet feed* natural (PFN), respectivamente, para os diâmetros de 5  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ . O efeito da umidade na redução da emissão de particulados é significativo, principalmente para o diâmetro de 10  $\mu\text{m}$ , no qual a redução no número de partículas emitidas reduziu em 83,7% quando a umidade aumenta de 6% para 12%. Para o diâmetro de 5  $\mu\text{m}$ , a redução do número de partículas foi bem menos efetiva, apenas 30,3% de redução em relação a umidade de referência de 6%, o qual pode ser explicado pelo fato do *pellet feed* natural apresentar poucas partículas menores que 10  $\mu\text{m}$ , conforme mostrado na distribuição de tamanho de micropartículas, e a agregação dessas partículas ser mais complexa.

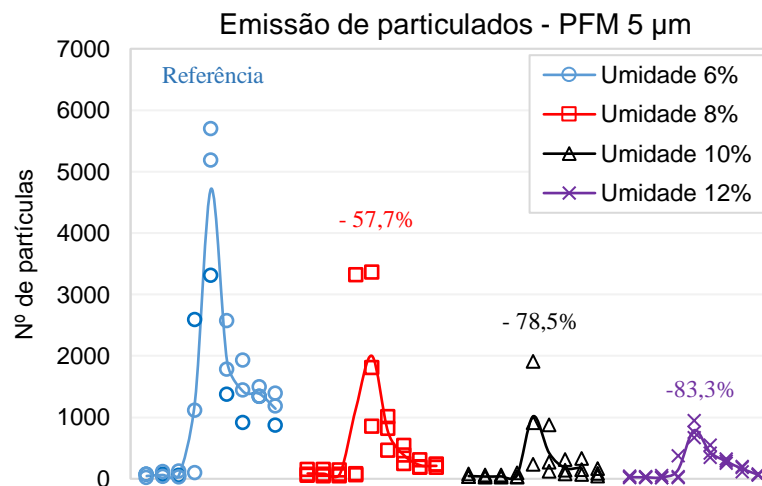


**Figura 5.16 – Influência do aumento de umidade na emissão de particulados de *pellet feed* natural de 5  $\mu\text{m}$  de diâmetro.**  
Fonte: Autoria própria, 2018.



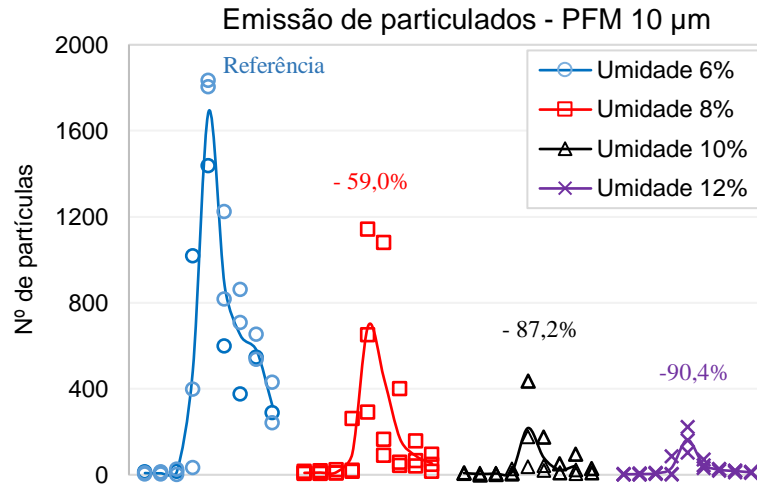
**Figura 5.17 – Influência do aumento de umidade na emissão de particulados de *pellet feed* natural de 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro.**  
Fonte: Autoria própria, 2018.

Os resultados dos ensaios em torre de poeira com o *pellet feed* moído e prensado (PFM) são apresentados na Figura 5.18 e na Figura 5.19, respectivamente, para os diâmetros de 5  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ . Em ambos os casos a umidade tem um efeito significativo na redução do número de partículas emitidas, com redução de 83,3 % para o diâmetro de 5  $\mu\text{m}$  e 90,4% para o de 10  $\mu\text{m}$ , quando a umidade aumenta de 6% (referência) para 12%. Diferentemente do *pellet feed* natural, no PFM, a redução na emissão de particulados em ambos os diâmetros de partículas foi similar, fato este que pode ser relacionado a distribuição de tamanho de partículas ultrafinas do *pellet feed* moído apresentar bem mais partículas com diâmetros inferiores a 10  $\mu\text{m}$ . Os resultados da distribuição de tamanho também estão de acordo com a quantidade de partículas geradas nos dois minérios de ferro, ou seja, conforme os resultados, o *pellet feed* moído apresenta mais partículas com diâmetros menores que 10  $\mu\text{m}$ , o que também pode ser observado nos resultados da torre de poeira em que o PFM emitiu mais partículas que o *pellet feed* natural.



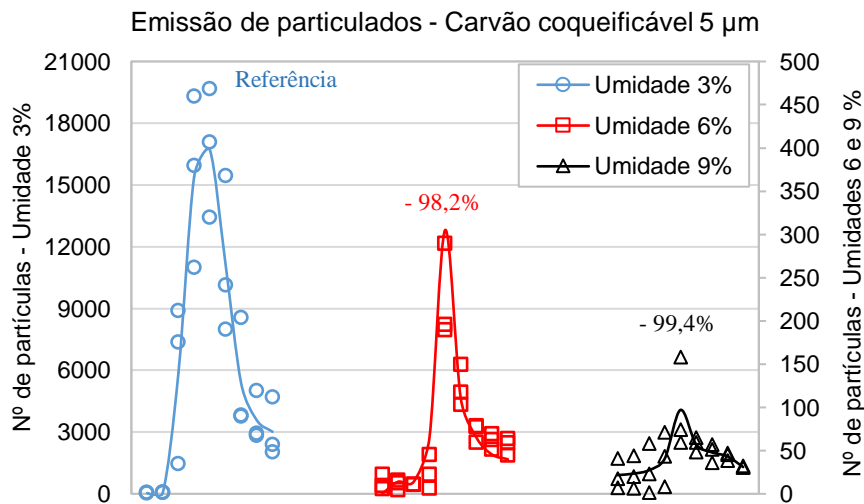
**Figura 5.18 – Influência do aumento de umidade na emissão de particulados de *pellet feed* moído de 5  $\mu\text{m}$  de diâmetro.**

**Fonte: Autoria própria, 2018.**

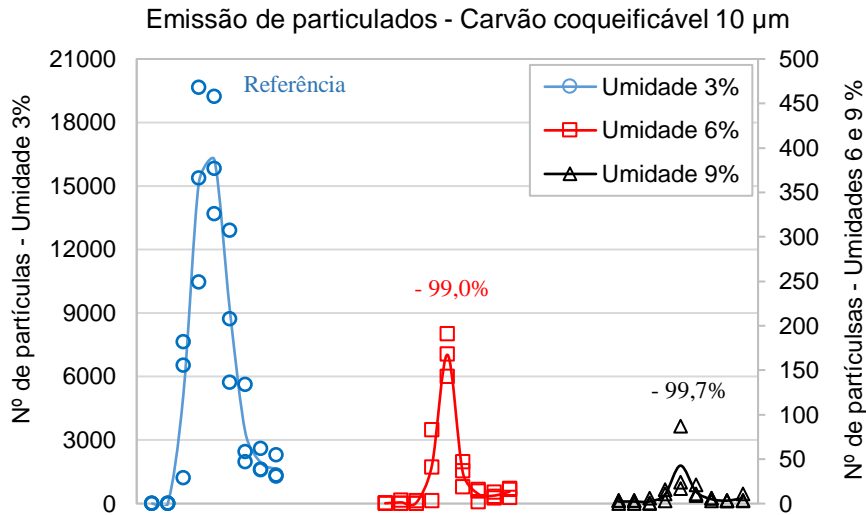


**Figura 5.19 – Influência do aumento de umidade na emissão de particulados de *pellet feed* moído de 10 µm de diâmetro.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

A Figura 5.20 e a Figura 5.21 apresentam os resultados do carvão coqueificável, para os diâmetros de 5 µm e 10 µm, respectivamente. Os resultados são muito similares nas três umidades, em ambos os diâmetros. No entanto, o efeito do aumento de umidade para o carvão é muito mais significativo, quando comparado aos pellets feed. A redução de partículas de carvão coqueificável de 5 µm foi de 98,2% na umidade de 6% e de 99,4% na umidade de 9%, em comparação a umidade de referência de 3%. Para o diâmetro de 10 µm, a redução foi similar, com 99% para a 6% de umidade e 99,7% para a 9% de umidade.

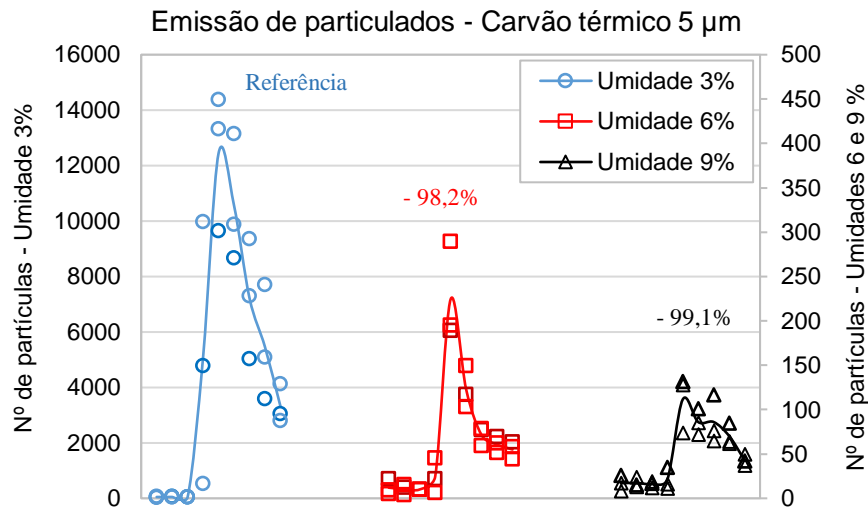


**Figura 5.20 – Influência do aumento de umidade na emissão de particulados de carvão coqueificável de 5 µm de diâmetro.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

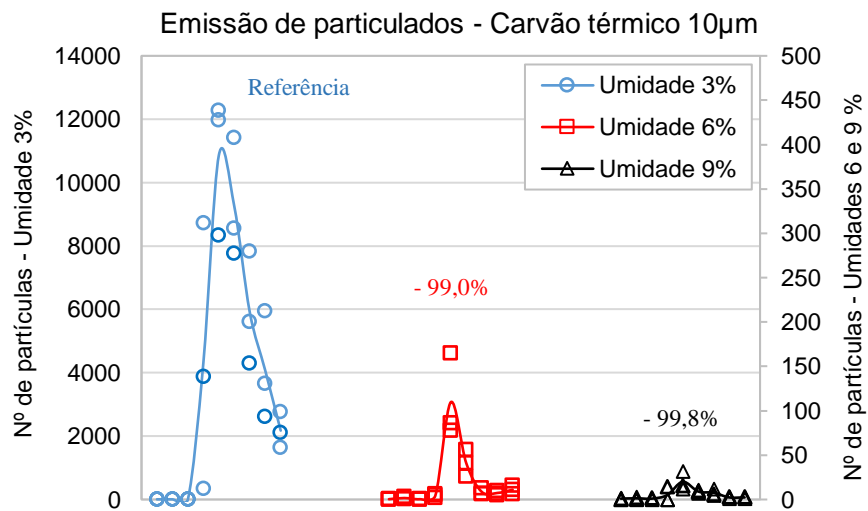


**Figura 5.21 – Influência do aumento de umidade na emissão de particulados de carvão coqueificável de 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Os resultados para o carvão térmico são apresentados na Figura 5.22 e na Figura 5.23, respectivamente, para os diâmetros de 5  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ . Similar ao carvão coqueificável, o aumento da umidade também tem efeito significativo e mais intenso na redução de particulados, quando comparado aos pellets feed. Para o diâmetro de 5  $\mu\text{m}$ , a redução no número de partículas foi de 99,1% quando a umidade aumenta de 3% para 9%, e para o diâmetro de 10  $\mu\text{m}$ , essa redução é de 99,8%. Devido à menor quantidade de material com granulometria igual e inferior a 10  $\mu\text{m}$  do carvão térmico, constatou-se que a quantidade de partículas geradas foi inferior à quantidade de partículas geradas no carvão coqueificável. Observa-se então que para as duas amostras carvão, há uma significativa redução no número de partículas com o aumento de umidade. Esses resultados são contrários aos encontrados na literatura, os quais afirmam que o carvão é naturalmente hidrofóbico e que a água não seria o supressor mais adequado para reduzir a emissão de particulados de carvão. Dessa forma, testes indiretos podem ser realizados com o propósito caracterizar a interação entre o carvão e água, e estabelecer se a água também consegue suprimir particulados maiores que 10  $\mu\text{m}$ . Mesmo assim, os resultados são suficientes para comprovar a boa performance da bancada de testes, os quais demonstram comportamentos esperados de redução da emissão de particulado gerado, com o aumento da umidade.



**Figura 5.22 – Influência do aumento de umidade na emissão de particulados de Carvão Térmico de 5  $\mu\text{m}$  de diâmetro.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**



**Figura 5.23 – Influência do aumento de umidade na emissão de particulados de Carvão Térmico de 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

### 5.3.3. Efeito de eletrólitos na supressão de particulados

Além da água, alguns agentes químicos foram utilizados em solução aquosa para verificar a sua influência na supressão da emissão de particulados. Estes reagentes são eletrólitos, que em solução estarão dissociados, liberando seus íons. O mecanismo de supressão da emissão de poeira usando estes reagentes pode estar associado à neutralização da carga elétrica das partículas, quando o processo de

heteroagregação ocorre, formando partículas aglomeradas de maior peso, sendo menos propensos a serem carregados pela corrente de ar. A Tabela 5.6 apresenta dos os reagentes utilizados, com seu peso molecular, valência e balanço cátion.

**Tabela 5.6– Reagentes usados como supressores de poeira.**

| Reagente              | Hidróxido de cálcio | Cloreto férrico | Cloreto de cálcio | Sulfato de alumínio          | Sulfato férrico              |
|-----------------------|---------------------|-----------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|
| Fórmula               | $\text{Ca(OH)}_2$   | $\text{FeCl}_3$ | $\text{CaCl}_2$   | $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ | $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ |
| <b>Peso Molecular</b> | 74,09               | 162,20          | 110,98            | 342,15                       | 399,88                       |
| <b>Valência</b>       | 2                   | 3               | 2                 | 3                            | 3                            |
| <b>Balanço cátion</b> | 1                   | 1               | 1                 | 2                            | 2                            |

**Fonte: Autoria própria, 2018.**

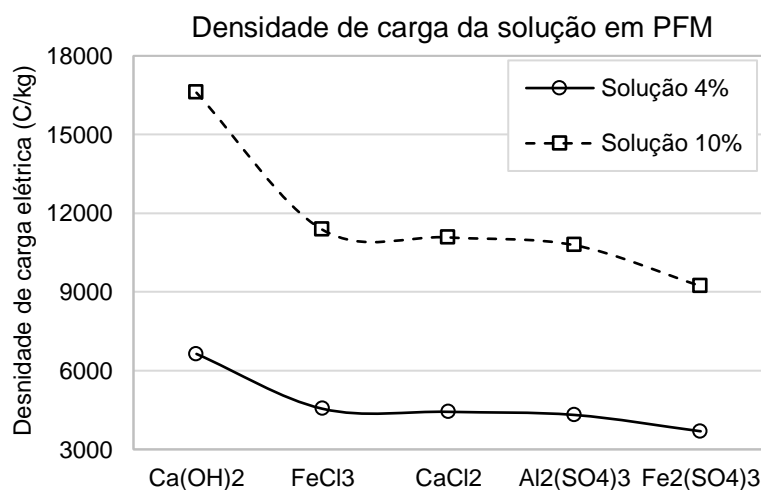
Os reagentes foram avaliados no *pellet feed* moído e prensado, pois ele apresentou maior número de partículas geradas nos testes em torre de poeira. Na umidade de 6% também foi observado o maior número de partículas de poeira geradas, por isso os ensaios foram feitos todos com o material nessa umidade. Para o PFM, o processo de mistura e homogeneização do material com reagente e água é o mesmo utilizado com a aplicação somente de água. Dessa forma, a mesma quantidade de água calculada para se obter um material úmido a 6% de umidade é utilizada para todas as soluções aquosas dos reagentes mencionados (aproximadamente 60 g de solução). Os reagentes eletrólitos também foram avaliados na supressão de partículas de 10  $\mu\text{m}$  de pelotas de minério de ferro somente, e com a adição de 1% de finos de pelota tamborada. Para os ensaios com pelota, especificamente, o procedimento de preparação das amostras descrito no item 3.2.2 deste trabalho precisa de algumas modificações, tais como:

- Copeland e Kawatra (2011) utilizam entre 2-16 ml de solução para cada 1 kg de pelota. Dessa forma, os ensaios realizados utilizam os mesmos valores;
- Todas soluções são preparadas a concentração de 4% e 10%, em massa, no intuito de comparar com os resultados obtidos por Copeland e Kawatra (2011);
- Copeland e Kawatra (2011) avaliaram a emissão de poeira em pelotas com 1%, em massa, de finos para cada 1 kg de pelota. Assim, para comparar o efeito da quantidade de finos na emissão de particulados, nesse trabalho serão avaliados os casos com as pelotas somente, e com adição de 1% de finos;

- No trabalho de Copeland e Kawatra (2011), as soluções utilizadas foram avaliadas com um tempo de cura, à temperatura ambiente, de 2 horas, embora os autores citam que o tempo de cura pode variar entre 5 min a 2 h. Dessa forma, nesse trabalho, as soluções serão avaliadas sem nenhum tempo de cura e com tempo de cura de 2h, no qual o material fica em repouso à temperatura ambiente até atingir o tempo de ensaio.

#### 5.3.4. *Pellet feed* moído

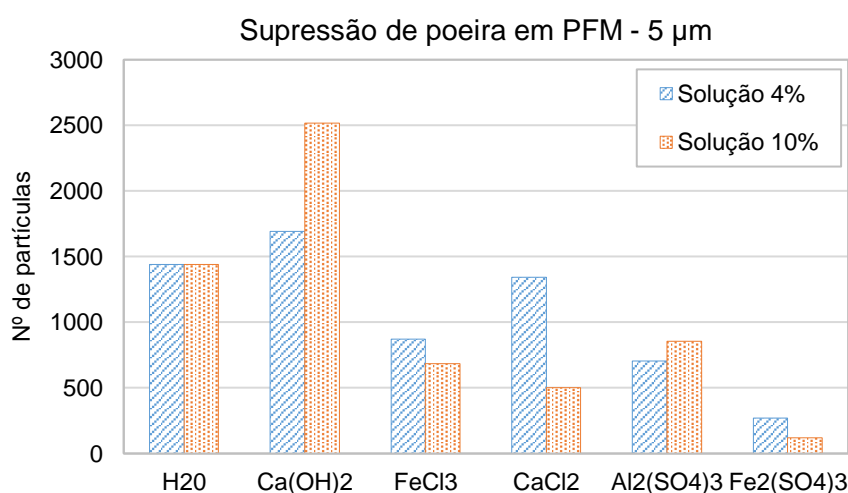
A Figura 5.24 apresenta a variação de densidade de carga elétrica, calculada para cada reagente nas duas concentrações avaliadas (4% e 10%). Observa-se que o aumento de concentração, eleva, significativamente, os valores de densidade de carga elétrica. Em cada série de experimentos, o volume e a concentração da solução de eletrólitos foram constantes, logo, a dosagem foi a mesma. Porém, como cada reagente tem um peso molecular diferente, e considerando a valência dos cátions que os compõem, a densidade de carga (Coulombs/kg), assume valores diferentes em cada ensaio. Nota-se também que o sulfato férrico apresenta a menor densidade de carga, para as duas concentrações, enquanto o hidróxido de cálcio, foi o que apresentou a maior densidade de carga.



**Figura 5.24 – Densidade de carga elétrica com variação da concentração da solução, em *pellet feed* moído.  
Fonte: Autoria própria, 2018.**



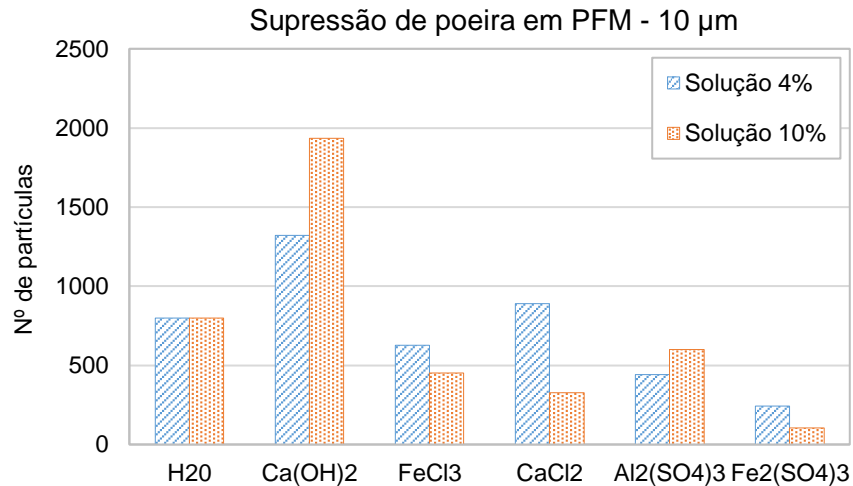
Os resultados dos ensaios em torre de poeira com os eletrólitos para partículas de 5  $\mu\text{m}$  de *pellet feed* moído são apresentados na Figura 5.25. Para as duas concentrações, o  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  foi o reagente que apresentou o melhor resultado, com redução de 81,3% à concentração de 4%, e 91,6% à concentração de 10%, em relação ao número de partículas emitidas com o uso somente da água. O  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{CaCl}_2$  e  $\text{FeCl}_3$  apresentaram desempenho menor que o  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , embora tenham reduzido o número de partículas, quando comparado com o desempenho do uso da água. Com o aumento da concentração da solução, o  $\text{CaCl}_2$  e  $\text{FeCl}_3$  melhoraram seu desempenho. O  $\text{CaCl}_2$  passou de uma redução no número de partículas geradas de 6,6% para 65%, e o  $\text{FeCl}_3$  passou de 39,3% para 52,4% de redução, em relação aos resultados obtidos com o uso de água somente. No entanto, o  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , teve seu desempenho reduzido com o aumento concentração, passando de 50,9% para 40,6%, com o aumento na concentração da solução. O reagente com o pior desempenho foi o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , pois o número de partículas geradas com a aplicação desse reagente aumentou, em ambas as concentrações, quando comparado aos valores obtidos com o uso da água. Na concentração de 4%, o aumento foi de 17,6%, e na concentração de 10%, o aumento foi de 74,9%.



**Figura 5.25 – Influência do uso de reagentes na emissão de particulados de *Pellet feed* Moído de 5  $\mu\text{m}$  de diâmetro.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

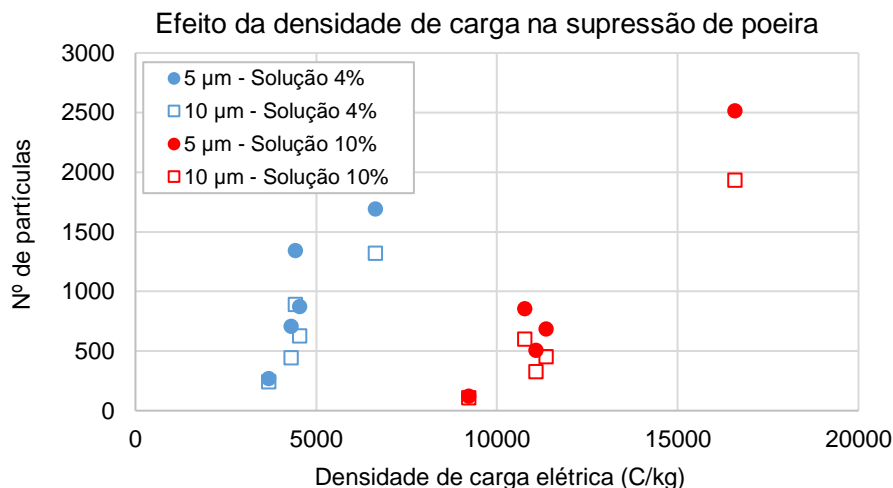
Os resultados dos ensaios com os reagentes para partículas de 10  $\mu\text{m}$  de *pellet feed* moído são apresentados na Figura 5.26. Percebe-se que os resultados tiveram comportamento semelhante aos observados para o diâmetro de 5  $\mu\text{m}$ , para todos os

reagentes, com o  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  tendo o melhor desempenho e o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  com o pior desempenho.



**Figura 5.26 – Influência do uso de reagentes na emissão de particulados de *Pellet feed* Moído de 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

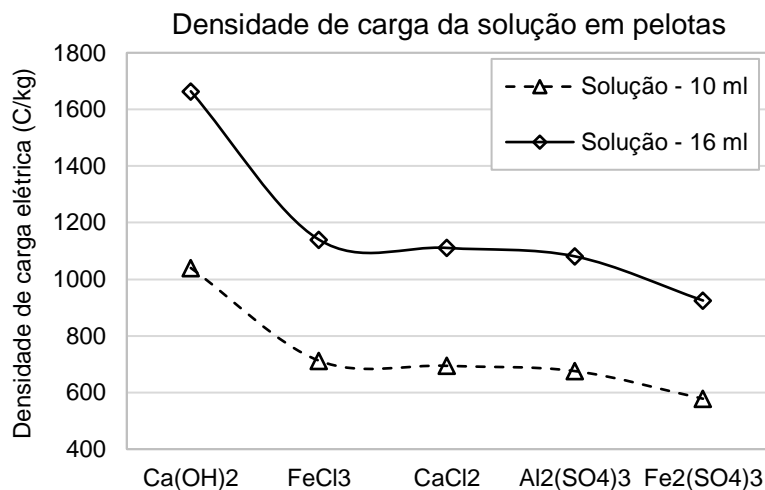
A Figura 5.27 mostra o efeito da densidade de carga na supressão da emissão de particulados, para o *pellet feed* moído. Cada ponto de uma série de experimentos representa um reagente (eletrólito). Para a série de experimentos com soluções a 4% de concentração, a emissão de particulados para os dois tamanhos de partículas mostrados é minimizada na mesma densidade de carga (~3700 C/kg). O mesmo comportamento foi encontrado para soluções com concentrações a 10%, embora neste caso, o mínimo ocorreu em uma densidade de carga maior (~9200 C/kg). Nas séries de experimentos com eletrólitos, o sulfato férrico foi o reagente que mais se aproximou da densidade de carga associada com a menor emissão de poeira (3689 C/kg para a solução a 4% e 9224 C/kg para a solução a 10%) e o hidróxido de cálcio foi o reagente mais distante dessa densidade (6638 C/kg para a solução a 4% e 16595 C/kg para a solução a 10%), o que explica porque o sulfato férrico teve o melhor resultado, enquanto o hidróxido de cálcio apresentou o pior resultado. Dessa forma, observa-se que o reagente com a maior densidade de carga, em ambas as concentrações,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , emitiu o maior número de partículas, enquanto que o reagente com a menor densidade de carga ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) apresentou o melhor desempenho.



**Figura 5.27 – Influência da densidade de carga na emissão de particulados com diâmetros de 5 µm e 10 µm pelo *Pellet feed* Moído, PFM, com 6 % de umidade. Fonte: Autoria própria, 2018.**

### 5.3.5. Pelotas

A Figura 5.28 apresenta a variação de densidade de carga elétrica, calculada para cada reagente, para os dois volumes de solução avaliados, 10 e 16 ml. O aumento do volume de solução (dosagem) aumentou significativamente os valores de densidade de carga elétrica. Em todas as séries de experimentos a concentração da solução de eletrólitos foi constante (4%, em massa), com variação somente da dosagem. Porém, como cada reagente tem um peso molecular diferente, e considerando a valência dos cátions que os compõem, a densidade de carga (Coulombs/kg), assume valores diferentes em cada ensaio. Nota-se também que o sulfato férrico apresenta a menor densidade de carga, para as duas dosagens, enquanto o hidróxido de cálcio, foi o que apresentou a maior densidade de carga, comportamento similar ao caso com variação de concentração da solução.



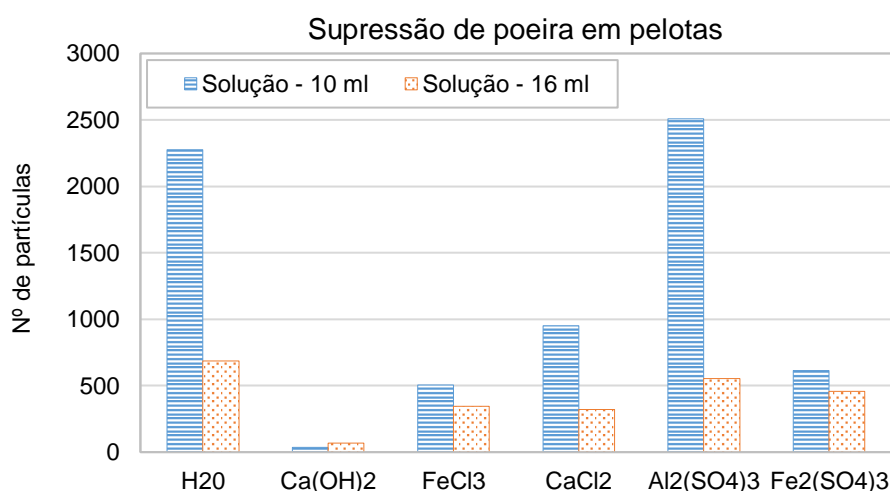
**Figura 5.28 – Densidade de carga elétrica com variação do volume da solução, em pelotas.**

**Fonte: Autoria própria, 2018.**

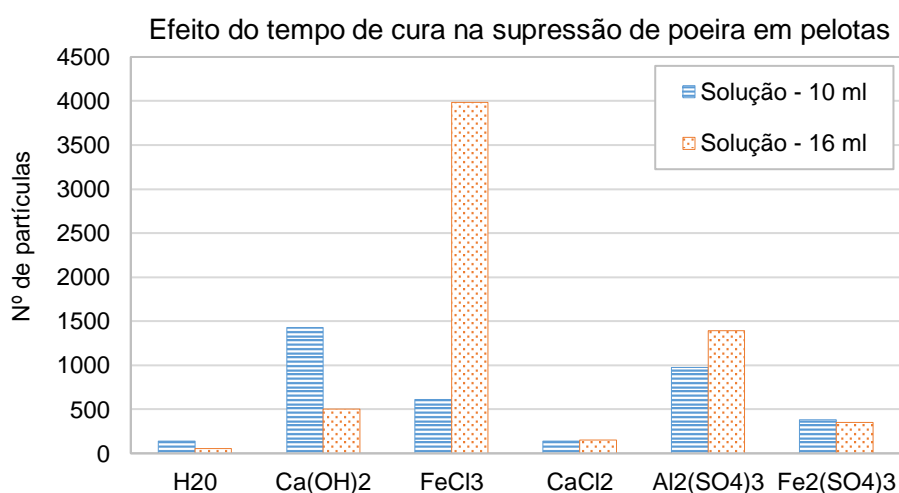
A Figura 5.29 apresenta os resultados obtidos em torre de poeira, com uso dos reagentes na supressão de particulados de pelotas de 10 µm de diâmetro. Observa-se que todos os reagentes foram mais eficientes que a água na redução da emissão de particulados, em suas respectivas dosagens, exceto o Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. O Ca(OH)<sub>2</sub> foi o reagente que apresentou o melhor resultado, nas duas dosagens avaliadas, embora tenha sido o reagente que apresentou o pior resultado para o *pellet feed* moído, fato esse que pode ser explicado pela quantidade de partículas mais finas no PFM em relação às pelotas. Os resultados também mostram que com a maior dosagem de solução (16 ml), o número de particulados gerados foi reduzido para todos os reagentes, podendo ser explicado pelo aumento da dosagem e, conseqüente, aumento da umidade aplicadas sobre a amostra. Portanto, a dosagem da solução é um fator importante a ser investigado, pois influencia na densidade de carga na solução do supressor e na supressão de particulados.

O efeito do tempo de cura de 2 horas no desempenho dos reagentes na supressão de particulados de pelotas é apresentado na Figura 5.30. Os resultados mostram que o tempo de cura foi prejudicial na supressão da emissão de particulados, com o aumento da geração de particulado para a maioria dos reagentes. Aqueles que não tiveram aumento no número de partículas geradas, em relação ao uso somente de água, tiveram comportamento similar à água. A aplicação somente da água também passou pelo mesmo tempo de cura que os demais reagentes, ou seja, o efeito de secagem natural é o mesmo para todos os reagentes avaliados. O tempo de cura

também influenciou no desempenho dos reagentes, em relação ao aumento da dosagem da solução. Nesse caso, nenhum dos reagentes melhoraram seus desempenhos com o aumento da dosagem da solução, quando comparado aos resultados com o uso da água, comportamento diferente ao encontrado na condição sem tempo de cura. Um fator importante que pode explicar esse comportamento está relacionado ao comportamento exotérmico observado durante o preparo das amostras com a utilização de alguns reagentes, o que pode influenciar na taxa de secagem da mistura, haja visto que a dosagem é baixa, embora um estudo mais detalhado das características de cada reagente deve ser feito.

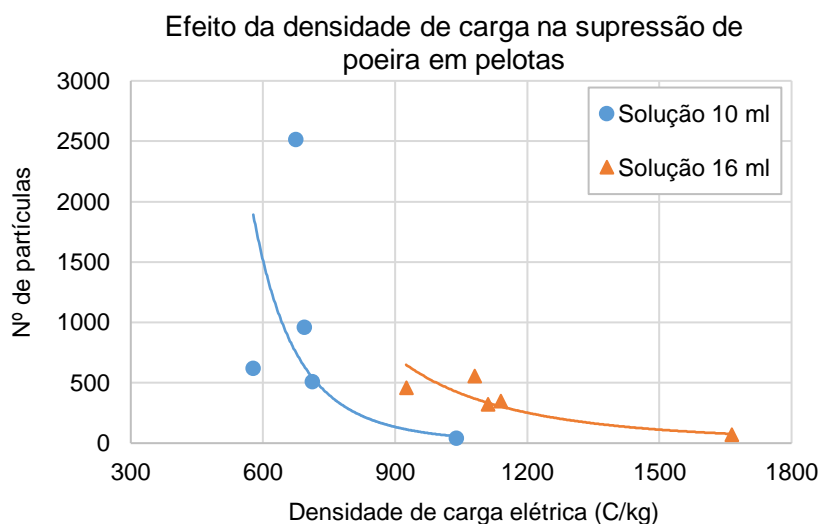


**Figura 5.29 – Influência do uso de reagentes na supressão de particulados de pelotas de 10 µm de diâmetro.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**



**Figura 5.30 – Influência do tempo de cura dos reagentes na supressão de particulados de pelotas de 10 µm de diâmetro.**  
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

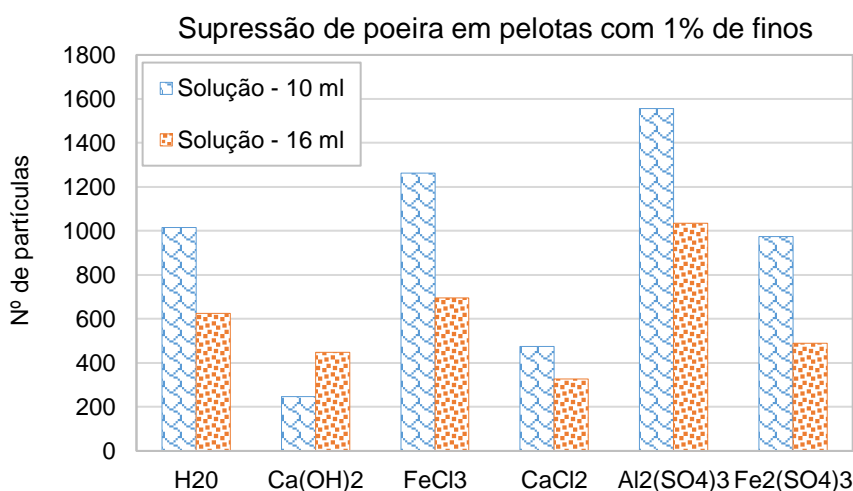
A Figura 5.31 mostra o efeito da densidade de carga na supressão da emissão de particulados por pelotas. Cada ponto de uma série de experimentos representa um reagente. Para a dosagem de 10 ml, a emissão de particulados é minimizada em um valor de densidade de carga entre 750 e 1040 C/kg. Para a dosagem de 16 ml o mínimo ocorreu entre 1200 e 1700 C/kg. Nas séries de experimentos com eletrólitos, o hidróxido de cálcio foi o reagente que mais se aproximou da densidade de carga associada com a menor emissão de poeira (1040 C/kg para a dosagem de 10 ml e 1664 C/kg para a dosagem de 16 ml). O sulfato férrico e o sulfato de alumínio foram os reagentes que mais se afastaram da densidade de carga ótima, o que explica o mau desempenho destes reagentes. O pior resultado do sulfato de alumínio pode estar relacionado à regulação do pH, que não foi avaliado neste trabalho. Portanto, os resultados de todas as séries de experimentos parecem indicar que existe uma densidade de carga que minimiza a emissão de particulados (ótima), reiterando a necessidade de novos experimentos explorando a dosagem e densidade de carga para todos os reagentes, e associando-os à testes pelos métodos indiretos (potencial zeta).



**Figura 5.31 – Influência da densidade de carga na supressão de particulados de pelotas com diâmetros 10  $\mu\text{m}$ .  
Fonte: Autoria própria, 2018.**

### 5.3.6. Pelotas com adição de 1% de finos

Os resultados obtidos dos ensaios em torre de poeira com a adição de 1 % de finos de pelota são mostrados na Figura 5.32, para as duas dosagens de solução avaliadas, 10 e 16 ml. Percebe-se que o aumento no volume da solução reduz a concentração de emissão de poeira para quase todos os reagentes, incluindo a água, exceto para o  $\text{Ca(OH)}_2$ , o qual tem um comportamento contrário (aumentando o número de partículas com 16 ml de solução), embora esse seja o reagente que teve o melhor desempenho, juntamente com o  $\text{CaCl}_2$ . O cloreto de cálcio, no entanto, teve seu desempenho melhorado com o aumento da dosagem de solução utilizada, diferentemente da condição sem a adição de finos de pelota (Figura 5.29). Os reagentes  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{FeCl}_3$  e  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , apresentaram resultados piores que os obtidos somente com a utilização de água.

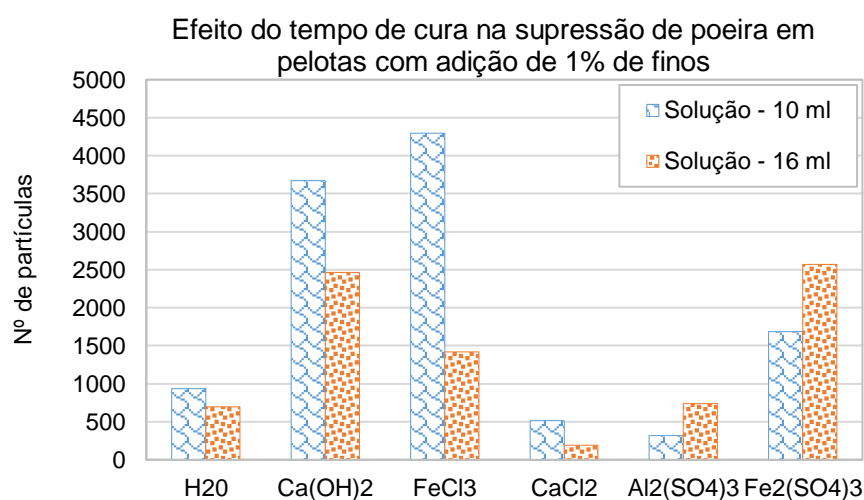


**Figura 5.32 – Influência do uso de reagentes na supressão de particulados de 10 µm de diâmetro de pelotas com adição de 1% de finos.**

**Fonte: Autoria própria, 2018.**

A Figura 5.33 mostra os resultados obtidos para as pelotas com 1% de fino, com tempo de cura de 2 horas da solução com reagentes. Esses resultados são muito importantes, uma vez que essa é uma situação similar ao utilizado por Copeland e Kawatra (2011). O único reagente que apresentou resultados melhores que o uso da água, para as duas dosagens da solução foi o  $\text{CaCl}_2$ . Os demais reagentes apresentaram resultados piores que o uso somente de água. Não foi observada redução na emissão de particulados com o aumento da dosagem para o sulfato de

alumínio e sulfato de ferro. Para a água, como já esperado o aumento no volume de solução reduz a emissão de particulados. Para o  $\text{CaCl}_2$  o tempo de cura teve grande influência na supressão de poeira. Os resultados mostram que o tempo de cura favoreceram a redução da concentração de particulados, embora não apresente o mesmo comportamento de reduzir a emissão próximo a linha de referência, onde se nota uma concentração próximo a zero, como encontrados por Copeland e Kawatra (2011). Portanto, mais experimentos devem ser feitos para avaliar melhor a influência do volume e tempo de cura das soluções.



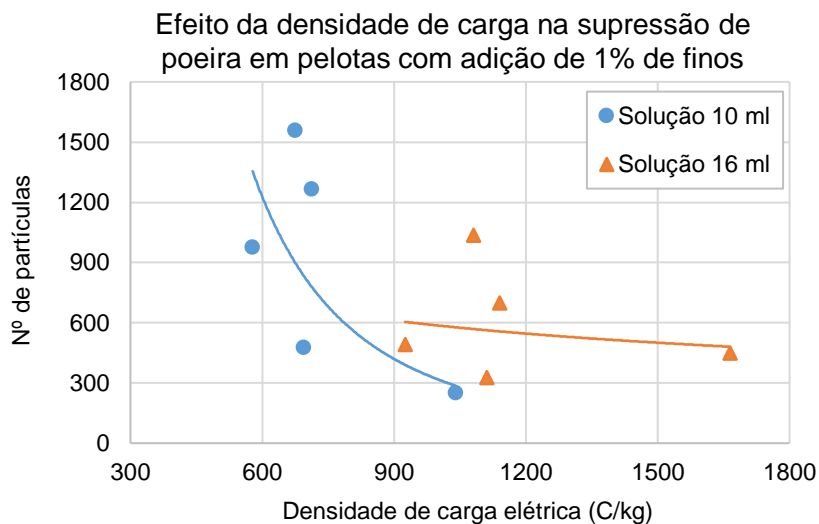
**Figura 5.33 – Influência do tempo de cura dos reagentes na supressão de particulados de 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro de pelotas com adição de 1 % de finos.**

**Fonte: Autoria própria, 2018.**

A Figura 5.34 mostra o efeito da densidade de carga elétrica na supressão de particulados de pelotas, na condição com 1% de finos de pelota. O tempo de cura não é considerado nessa análise. Cada ponto da série representa um dos reagentes eletrólitos avaliados em solução aquosa a concentração de 4%, para as dosagens de 10 e 16 ml. Para a dosagem de 10 ml a emissão de particulados é minimizada em um valor de densidade de carga entre 695 e 1040 C/kg, representando o  $\text{CaCl}_2$  e o  $\text{Ca(OH)}_2$ , respectivamente. Para a dosagem de 16 ml o mínimo ocorreu entre 1200 e 1700 C/kg ( $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{CaCl}_2$ , respectivamente). Os reagentes que mais se aproximaram da densidade de carga associada com a menor emissão de poeira foram o hidróxido de cálcio, com 10 ml, e o cloreto de cálcio, com a dosagem de 16 ml. O cloreto férrico, sulfato férrico e o sulfato de alumínio foram os reagentes que mais se afastaram da densidade de carga ótima de associada a menor emissão, apresentando



os piores desempenhos entre os reagentes testados. Portanto, os resultados com a adição de 1% de finos de pelota também indicam que existe uma densidade de carga que minimiza a emissão de particulados, reiterando a necessidade de novos experimentos para avaliar a densidade de carga ótima para todos os reagentes.



**Figura 5.34 – Influência da densidade de carga na supressão de particulados de 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro de pelotas com adição de 1% de finos.**  
Fonte: Autoria própria, 2018.

O memorial de cálculo da densidade de carga elétrica é apresentado no APÊNDICE F, e todos os resultados dos testes em torre de poeira, avaliando a influência da densidade de carga em função da concentração e dosagem da solução dos reagentes eletrólitos podem ser consultados no APÊNDICE G.

## 6. CONCLUSÃO

A escolha adequada do mecanismo de supressão de poeira de minérios ainda é um desafio para as indústrias, devido à escassez de normas e técnicas de caracterização da emissão de poeira de cada material. Dessa forma, esse trabalho teve por objetivo desenvolver equipamentos e procedimentos experimentais para avaliação da emissão de particulados no manuseio e transporte de minérios, com base nas técnicas mais comuns na literatura, as quais destacam-se ensaios em túnel de vento, que simulam o transporte do material em vagões de trens, e ensaios em torre de poeira simulam a geração de particulados durante seu manuseio.

Através dos resultados de caracterização dos materiais, observou-se que o *pellet feed* moído possui uma quantidade maior de finos que o *pellet feed* natural. Entre as amostras de carvão, o coqueificável apresentou maior percentual de finos que o carvão térmico. Também foi possível verificar que o *pellet feed* natural (PFN) apresenta 8,09% de partículas com diâmetro menor que 10  $\mu\text{m}$ , enquanto o *pellet feed* moído (PFM), apresenta 38,3%. Considerando as curvas de massa específica aparente em função da umidade, observa-se que tanto os minérios de ferro, quanto os carvões apresentam valores mínimos e máximos locais. Para os minérios de ferro, o mínimo é observado em torno de 5 a 6% e o máximo entre 11 e 15%, sendo o PFM aquele que apresenta a maior faixa de umidade da zona capilar, o que pode estar associado devido ao seu maior percentual de finos. Para os carvões, o mínimo é similar aos minérios de ferro, embora o seu limite máximo seja na ordem de 24 a 25%, fato este que pode estar associado à característica mais porosa do carvão.

A bancada de ensaios foi desenvolvida adaptando-se os instrumentos necessários para caracterização da emissão de particulado em modelos de vagões de trem, em um túnel de vento existente na infraestrutura laboratorial do FLUIDPAR. Para a validação da metodologia experimental, utilizou-se inicialmente como variável a perda de massa total do material em função da sua umidade. Os ensaios de arrasto eólico em túnel de vento mostram uma redução significativa na perda de massa total, com o uso somente de água, quando há o aumento da umidade de 6% para 12%, no caso dos *pellet feeds* e de 3% para 9% de umidade, no caso dos carvões. A perda de massa de material é muito mais significativa quando a velocidade do escoamento aumenta. Os resultados também apontam uma grande influência da umidade relativa

do ar na emissão de particulados, uma vez que a redução na umidade relativa do ar propicia uma condição favorável a emissão de particulados durante o ensaio.

O mecanismo de secagem do material devido ao escoamento de ar foi avaliado de duas formas: pela umidade global do material no modelo de vagão e pela estratificação em camadas do material. Os resultados para umidade global não apresentaram nenhuma tendência clara, em relação a variação de velocidade do ar. Para as umidades iniciais de 6% e 8%, a umidade final do material foi maior quanto maior a velocidade do escoamento, enquanto para a umidade de 12%, observou-se um comportamento contrário. Na avaliação por estratificação, os resultados mostram que o gradiente de umidade e a perda de umidade para a velocidade de 70 km/h para a amostra de referência com 12% de umidade, mostrando que o processo de secagem superficial (evaporação) é mais acentuado quanto maior for a velocidade do escoamento, e que a menor taxa de evaporação para a velocidade mais baixa limitou a difusão de água para as camadas superiores. Entretanto, para a amostra de referência com 8% de umidade, os perfis de umidade em função da profundidade da camada foram similares para as velocidades de escoamento de 40 e 70 km/h. Quanto menor a velocidade do escoamento, menor é a taxa de evaporação, pois há um tempo maior de exposição ao escoamento antes da partícula ser arrastada. Assim, o material da superfície irá secar mais lentamente e a água contida no material nas camadas mais abaixo da superfície tem tempo suficiente para migrar por difusão até o material da camada exposta ao escoamento de ar, apresentando um gradiente mais homogêneo de umidade.

Supressores comerciais comumente utilizados pela Vale no Sistema Sudeste tiveram seu desempenho avaliados em relação a perda de massa total de material. Os resultados mostram que todos os supressores reduziram, significativamente, a perda de massa total, em relação ao material sem cobertura, com percentuais de redução muito similares, na faixa de 92,6 a 93,9%, sendo o FPM aquele que apresentou o melhor desempenho. No entanto, a água pura teve um desempenho muito similar aos produtos químicos comerciais, com redução de 92,5% na perda de massa total, em relação ao material sem cobertura.

Nos ensaios em torre de poeira, o efeito da umidade na redução da emissão de particulados é significativo, reduzindo consideravelmente o número de partículas geradas (na faixa de 80 a 90%) para ambos os diâmetros de partículas, 5 e 10  $\mu\text{m}$ , quando a umidade do material aumenta de 6% para 12%, nos minérios de ferro. Para

o carvão, essa redução é muito mais significativa, quando a umidade aumenta de 3% para 9%, com redução na ordem de 99 a 99,8%. Os resultados com os reagentes eletrólitos para o *pellet feed* moído, pelotas e pelotas com adição de 1% de finos de pelotas tamboradas, foram avaliados com variação de concentração, em massa, de 4% e 10% para o *pellet feed* moído, e com variação da dosagem da solução, de 10 e 16 ml, para as pelotas e seus finos, a uma concentração fixa de 4%. Para o *pellet feed* moído, os resultados mostram que o sulfato férrico,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , foi o reagente que apresentou o melhor resultado em comparação ao uso somente da água. O aumento da concentração para 10% do  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , diminuiu ainda mais a emissão de partículas do *pellet feed* moído. Ao avaliar o efeito da densidade de carga elétrica, nota-se que a variação da densidade de carga afeta, diretamente, o desempenho da solução na supressão de poeira, sendo observado que o sulfato férrico foi o reagente que mais se aproximou da densidade de carga associada com a menor emissão de poeira e o hidróxido de cálcio foi o reagente que mais se afastou, o que explica porque o sulfato férrico teve o melhor resultado, enquanto o hidróxido de cálcio apresentou o pior resultado.

Para a supressão da emissão de particulados em pelotas, o hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , e o cloreto de cálcio,  $\text{CaCl}_2$ , apresentaram os melhores resultados para supressão da emissão de poeira, quando comparados com o uso somente de água. O hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , apresentou resultados excelentes, resultado completamente contrário ao encontrado para o *pellet feed* moído. A análise da densidade de carga parece elucidar essa aparente contradição, indicando que, nas condições usadas nos testes, pode haver um mínimo na emissão de particulados nas densidades de carga entre 750 e 1040 C/kg para a dosagem de 10 ml e entre 1200 e 1700 C/kg para a dosagem de 16 ml. Em relação ao tempo de cura das soluções, os resultados mostram que o tempo de cura foi prejudicial na supressão da emissão de particulados, com o aumento da concentração para a maioria dos reagentes. Aqueles que não tiveram aumento em relação ao uso somente de água, tiveram comportamento similar à água. Para os testes em pelotas com adição de 1% de finos, os resultados mostram que, para a condição sem tempo de cura, o hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , e o cloreto de cálcio,  $\text{CaCl}_2$ , também apresentaram os melhores resultados para supressão da emissão de poeira, quando comparados com o uso somente de água. No entanto, para o  $\text{CaCl}_2$ , o tempo de cura teve grande influência na supressão de poeira, favorecendo a redução do número de partículas, em relação ao uso

somente de água, embora não apresente o mesmo comportamento de reduzir a emissão próximo a linha de referência, onde se nota uma concentração próximo a zero, como encontrados por Copeland e Kawatra (2011). Portanto, os resultados com o *pellet feed* moído, pelotas e seus finos, indicam que existe uma densidade de carga que minimiza a emissão de particulados. Portanto, estudos futuros devem ser feitos no intuito de determinar a densidade de carga que minimiza a emissão de particulados para todos os reagentes.

Por fim, a partir da gama de testes realizados podemos concluir que as bancadas de ensaio desenvolvidas e seus respectivos procedimentos experimentais, tanto em túnel de vento quanto em torre de poeira, apresentaram resultados satisfatório e coerentes, os quais são confiáveis para a caracterização da emissão de particulados de diversos materiais, e avaliação de desempenho de soluções para a supressão e controle da emissão de poeira, cumprindo portanto com os objetivos deste trabalho.

Além dos tópicos abordados nesse trabalho, algumas outras investigações podem ser feitas a partir dos equipamentos, metodologias de ensaios e dos resultados encontrados. A seguir são apresentados uma lista de algumas sugestões de trabalhos futuros que podem ser realizados para aprofundar ainda mais o tema de pesquisa dessa dissertação:

- Avaliação das características físicas dos materiais agregados devido à variação de umidade, tais como o efeito na distribuição de tamanho de partículas agregadas e esfericidade do agregado, relacionando essas características ao percentual de finos;
- Determinação dos estados de liquidez do material em função da sua umidade, e correlacionando os resultados com a curva característica do ensaio de variação de massa específica aparente em função da umidade;
- Ensaios em túnel de vento sob condições ambientes controladas, para determinação da influência de cada parâmetro (inerentes ao ambiente e ao material) na perda de massa de material associado ao efeito do arrasto eólico;
- Avaliação do mecanismo de secagem do material em modelo de vagão de trem e em pilhas de minérios, sob condições ambientes controladas;
- Influência de métodos controle de emissão de particulados atuantes na superfície do material exposta ao escoamento de ar, tais como: umidade superficial e compactação da superfície do material;

- Determinar a velocidade mínima do escoamento de ar no interior da torre de poeira, necessária para carregar um determinado diâmetro de partícula, correlacionando também a propriedades do material como massa específica e esfericidade;
- Determinação da curva de potencial zeta em função da concentração da solução aquosa com reagentes eletrólitos, no intuito de correlacionar a neutralização da carga elétrica com a supressão da emissão de particulados de minérios;
- Determinação da umidade crítica, na qual há emissão de poeira, para diferentes tipos de materiais, através da torre de poeira e túnel de vento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. **Movimentação de carga no setor portuário cresce 8,3%**. Brasília, DF: ANTAQ, 2018a. Disponível em: <http://portal.antaq.gov.br/index.php/2018/02/15/movimentacao-de-carga-no-setor-portuario-cresce-83/>. Acesso em: 03 mar. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. **Anuário 2017**. Brasília, DF: ANTAQ, 2018b. Disponível em: [http://portal.antaq.gov.br/wp-content/uploads/2018/02/20180112\\_Anuário\\_2017\\_v4-4-versão-final.pdf](http://portal.antaq.gov.br/wp-content/uploads/2018/02/20180112_Anuário_2017_v4-4-versão-final.pdf). Acesso em: 03 mar. 2018.

ALLEN, John R. L. **Physical processes of sedimentation. An introduction**. 4. ed. London, UK: George Allen and Uwin, Ltd, 1970. 326p. Bibliografia: p. 49-52. ISBN: 978-0045510146.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BAGUL, R.; MAHAJAN, V.; DHAKE, A. New approaches in nanoparticulate drug delivery system: A review. **International Journal of Current Pharmaceutical Research**, v. 4, n. 2, p. 29–38, 2012.

BARROS, Andressa Loureiro Moretto. **Distribuição horária de lotes de vagões GDE para carregamento de minério na EFVM**. 2008. Monografia (Especialização em Transportes Ferroviário de Carga) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

BASCOM, R.; BROMBERG, P. A; COSTA, D. A; DEVLIN, R.; DOCKERY, D. W; FRAMPTON, M. W; SAMET, J. M; SPEIZER, F. E; UTELL, M. Health effects of outdoor pollution. **American journal of respiratory and critical care medicine**, v. 153, p. 3-50, 1996.

BEKKIOUI, N., ZOULALIAN, A., Hakam, A., BENTAYEB, F., SESBOU, A. Modelling of a solar wood dryer with glazed walls. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 11, n. 3, p. 191-205, 2009.

BURNS, Stuart. **Alunorte's restart does not bode well for aluminum prices**. 1 fotografia. Disponível em: <https://agmetalmminer.com/2019/05/28/alunortes-restart-does-not-bode-well-for-aluminum-prices/>. Acesso em: 01 jun. 2019.

BUTT, Hans-Jürgen; KAPPL, Michael. Normal capillary forces. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 146, n. 1-2, p. 48–60, 2009.

CARDOSO, João S. L. **Proposição de uma metodologia para a comparação de desempenho operacional de terminais portuários de granéis sólidos minerais**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CECALA, A. B., O'BRIEN, A. D., SCHALL, J, COLINET, J. F., FOX, W. R., FRANTA, R. J., Joy, J., REED, W. R., REESER, P. W., ROUNDS, J. R., SCHULTZ, M. J. **Dust control handbook for industrial minerals mining and processing**. Pittsburgh, PA: Department of health and human services, 2012. 314p. Bibliografia: p. 7-58. ISBN: 978-1493566402.

CHANDER, S., MOHAL, B. R., APLAN, F.F. Wetting behavior of coal in the presence of some nonionic surfactants. **Colloids and Surfaces**. v. 26, p. 205–216, 1987.

CHANDER, S., MOHAL, B. R., APLAN, F.F: Wetting characteristics of particles and their significance in dust abatement. *In: Proceedings of Respirable Dust in the Mineral Industries: Health Effects, Characterization and Control*. University Park, PA, 1988. p. 19-23.

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, p. 232–238, 2009.



COPELAND, C. R.; KAWATRA, S. K. Dust suppression of iron ore processing plants. **Minerals & Metallurgical Processing**, v. 22, n. 4, p. 177-191, 2005.

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

CORSON, L. A.; FISHER, S. A. **Manual of best management practices for port operations and model environmental management system**. Wisconsin, EUA: Great Lakes Maritime Research Institute – GLMRI, 2009.

CRISTOVICI, Marius. A. Investigation to control mine dust using surfactants and a new approach for eliminating their negative effect on flotation. **Minerals & Metallurgical Processing**, v. 8, n. 1, p. 38–42, 1991.

DAVID, Airton Checoni. **Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

DJUKIC, M.; PLANNER, J. H. **Evaluation of Dust Emission from Coal Wagons**. Bulk Europe. Conference held in September Glasgow, Scotland. 2010.

DRAVES, C.Z.; CLARKSON, R.G. A new method for the evaluation of wetting agents. **Proceedings of American Association of Textile Chemist & Colorist**, vol. 20, p. 109-116, 1931.

DUSTBUSTERS RESEARCH GROUP. **Agricultural guide to controlling windblown sand and dust**, 2010. Disponível em: [http://www.kernair.org/Documents/Dust\\_Buster/Dustbusters%20Agricultural%20Guide%2010-25-10.pdf](http://www.kernair.org/Documents/Dust_Buster/Dustbusters%20Agricultural%20Guide%2010-25-10.pdf). Acesso em: 25 fev. 2019.

ECOSOFT. **Medição de emissão de material particulado em fontes difusas**. 1 fotografia. Disponível em: <http://www.ecosoft.com.br/home/monitoramento/?lang=en>. Acesso em: 13 mar. 2018.

ENTENDA o que é o pó preto que polui o ar e o mar de Vitória há anos. **O Globo**, São Paulo, 11 janeiro 2017. Disponível em: <http://g1.globo.com/espirito-santo/noticia/2016/01/entenda-o-que-e-o-po-preto-que-polui-o-ar-e-o-mar-de-vitoria-ha-anos.html>. Acesso em 22 ago. 2017.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Table of Historical Particulate Matter (PM) National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)**. Washington, D.C: EPA, 2016. Disponível em: <https://www.epa.gov/pmcourse/what-particle-pollution>. Acesso em: 15 set. 2017.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **What is particle pollution?** Washington, D.C: EPA, 2017. Disponível em: <https://www.epa.gov/pmcourse/what-particle-pollution>. Acesso em: 15 set. 2017.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **NAAQS Table**. Washington, D.C: EPA, 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>. Acesso em: 05 set. 2020.

ERBIL, Husnu Yildirim. **Surface Chemistry of Solid and Liquid Interfaces**. 1 ed. Oxford: Blackwell Publishing Ltd. 2006.

ESTRADA de Ferro Carajás: o caminho onde passa a nossa riqueza. **Vale**, 2017b. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/innovation/carajas-railway/Paginas/default.aspx>, Acesso em: 06 ago. 2017.

FERREIRA, A. D.; VAZ, P. A. Wind tunnel study of coal dust release from train wagons. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 92, n. 7–8, p. 565–577, 2004.

FERROVIA Vitória a Minas transportou 119 milhões de toneladas e cerca de 1 milhão de pessoas em 2014. **Vale**, 2015. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/ferrovia-vitoria-minas-transportou-119-milhoes-toneladas-cerca-1-milhao-pessoas-2014.aspx>. Acesso em: 06 ago. 2017.

FLUIDJET. **Comparativo sistema abatimento de pó FLUIDJET**. 1 fotografia. Disponível em: <http://www.fluidjet.com.br/fotos-sistemas.htm>. Acesso em: 05 fev. 2018.

FOUST, A. S.; WENZEL L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das operações unitárias**. 2 ed. [Principles of unit operations, 2nd ed. (inglês)]. Tradução de Macedo H. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley & Sons. 1993.

FREW, I., WYPYCH, P. W., MAR, L. Different modes of dust testing for bulk solids. *In*: 11th INTERNATIONAL CONFERENCE ON BULK MATERIALS STORAGE, HANDLING AND TRANSPORTATION, 2013, Australia, **Proceedings [...]**. Australia: University of Newcastle, 2013. p. 1-8.

GESTÃO Ambiental do Complexo de Tubarão. **Vale**, 2017d. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/pt/initiatives/environmental-social/complexo-tubarao/paginas/default.aspx#gestao-ambiental>. Acesso em: 25 ago. 2017.

GOMES, L. M.; AMARANTE MESQUITA, A.L. Effect of particle size and sphericity on the pickup velocity in horizontal pneumatic conveying. **Chemical Engineering Science**. v. 104, p. 780–789, 2013.

GONTIJO, Carlos F. Caracterização de minério de ferro para desaguamento. *In*: 18º SIMPÓSIO DE MINERAÇÃO, 2017, São Paulo, **Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração**. São Paulo: ABM Week, v. 47, n.18, 2017.

GUARIEIRO, Lílian I. N.; GUARIEIRO, Aline L. N. Vehicle emissions: what will change with use of biofuel? **Biofuels - Economy, Environment and Sustainability**. Croácia, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/52513>. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/biofuels-economy-environment-and-sustainability/vehicle-emissions-what-will-change-with-use-of-biofuel->. Acesso em: 15 jul. 2017.

GUEDES, Luís F. O. **Subsídios para a implantação do sistema de gestão ambiental em portos organizados**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

GUTIERREZ, Mariana Tramuja. **Diferenças entre resultados provenientes de diferentes métodos de análise granulométrica: precisão**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Oceanografia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

HEIDER, Mathias. Cenários de produção para o minério de ferro no Brasil em 2030 – parte III. **Revista In The Mine**, São Paulo, 64 ed., p. 9-12, 2017.

INFORME MINERAL 1º/2017. – Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, 2017. ISSN 1807-0388 versão online. Disponível em: [https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/informe-mineral/publicacoes-nacionais/informe\\_mineral\\_1\\_2017](https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/informe-mineral/publicacoes-nacionais/informe_mineral_1_2017). Acesso em: 02 dez. 2017.

INSTITUTO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Qualidade do Ar**. Cariacica, ES: IEMA, 2019. Disponível em: <https://iema.es.gov.br/qualidadedoar/legislacao>. Acesso em: 04 out. 2019.

KILAU, H. W. The wettability of coal and its relevance to the control of dust during coal mining. **Journal of adhesion science and technology**, v. 7, n. 6, p. 649-667, 1993.

KIM, J. **Respirable coal dust control using surfactants with special emphasis on a liquid spray system**. 1995. Tese (Doctor of Philosophy) - University of Missouri, Missouri, 1995.

KIM, J.; TIEN, J. C. The effect of added base on coal wetting ability of nonionic surfactant solutions used for dust control. **Mining Engineer**, v. 154, n. 399, p. 151–155, 1994.

KOST, J.A.; SHIREY, G. A.; FORD, C. T. **In-mine tests for wetting agent effectiveness (PB82-183344/ XAB)**. Bituminous Coal Research, Inc. Monroeville, PA., Bureau of Mines, 1980.

LEAL FILHO, L. S., ISHI, H. A., DE AZEVEDO, R. C. **Subsídios técnicos para redução de poeira no transporte de minério de ferro pela EFVM**. São Paulo, Universidade de São Paulo (USP) – Relatório interno da Vale/AS, 2011.

LOPES, Diana. A extração do ferro da rocha - como tudo acontece. **Indústrias Extractivas**, 2014. Disponível em: <https://www.mineralex.net/a-extracao-do-ferro-da-rocha-como-tudo-acontece/>. Acesso em: 20 jan. 2018.

LOPES, Marcos. O minério de ferro no Brasil: História, maiores empresas e mercado. **Portal Técnico em Mineração**, 2016. Disponível em: <https://tecnicoemineracao.com.br/minerio-de-ferro-no-brasil/>, Acesso em: 08 nov. 2017.

LOPES, Marcos. Carvão mineral no Brasil e no mundo. **Portal Técnico em Mineração**, 2017. Disponível em <https://tecnicoemineracao.com.br/carvao-mineral-no-brasil-e-no-mundo/>, Acesso em: 08 nov. 2017.

LOUREIRO, Luciana Neves. **Panorâmica sobre emissões atmosféricas estudo de caso: avaliação do inventário de emissões atmosféricas da região metropolitana do Rio de Janeiro para fontes móveis**. 2005. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

MATAI, P. H. L.; VILLANOVA, I.; CRESCENZO, A. **Caracterização de granéis de minério de ferro e carvão - Relatório técnico**. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2016.

MEIRELES, Reinaldo P. L. **Modelagem e simulação de malha ferroviária em circuito fechado da estrada de ferro Vitória a Minas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2010.

MEHTA, R. D. The aerodynamic design of blower tunnels with wide-angle diffusers. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 18, n. 1, p. 59-120, 1977.

MITARAI, Namiko; NORI, Franco. Wet Granular materials. **Advances in Physics**. v. 55, n.1-2, p. 1-45, 2006.

MOFFAT, Robert J. Contributions to the Theory of Single-Sample Uncertainty Analysis. **Experimental Thermal and Fluid Science**. v. 1, n.1, p. 3-17, 1988.

MOHAL, B. R.; CHANDER, S. A new technique to determine wettability of Powders-imbibition time measurements. **Colloids and Surfaces**, v. 21, p. 193-203, 1986.

MOHAL, B. R. **Enhancement of the wettability of coal powders using surfactants**. 1988. Tese (Doctor of Philosophy) - The Pennsylvania State University, Pennsylvania, 1988.

MORAIS, Fabiana Fonseca de. **Alto-Forno Sustentável – O mercado de carbono no Brasil com ênfase na produção de gusa a partir de carvão vegetal de florestas plantadas de eucalipto**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

MOREIRAS, Cláudia I. P. **Análise de Incertezas em Ensaio de Qualidade**. 2005. Dissertação (Mestrado em Estatística Aplicada e Modelação) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2005.

MOURÃO, José Murilo. **Aspectos conceituais relativos à pelletização de minérios de ferro**. Vitória: Conceitual consultoria mineiro-siderúrgica. 2017. *E-book*. Disponível em: <https://www.abmbrasil.com.br/download/file/aspectos-conceituais-relativos-a-pelotizacaode-minerio-de-ferro>. Acesso em: 07 dez. 2018.

PEREIRA, J. L. G., FORTES, J. D. N., E MARTINS, E. M. Poluição do ar por material particulado em área intraurbana no rio de janeiro: alguns aspectos metodológicos. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 10, n. 3, p. 53-67, 2015. ISSN 2179-0612. DOI 10.5216/reec.V10i3.32901.

PIERRAT, P.; CARAM, H.S. Tensile strength of wet granular materials. **Powder Technology**, v. 91, n. 2, p. 83-93, 1997.

PLANNER, J. A sustainable approach to manage dust emission during handling and transport of coal and iron ore. *In*: CASANZ Conference, 2011, Auckland, **Proceedings [Paper 203]**. New Zealand, 2011.

PORTER, M. R. **Handbook of Surfactants**. 1 ed. Chapman & Hall. 1991. ISBN 978-1-4757-1295-7. DOI 10.1007/978-1-4757-1293-3.

PONTA da madeira embarca primeiros navios incluindo carga produzida na mina de S11D. **Vale**, 2017c. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/ponta-da-madeira-embarca-primeiros-navios-incluindo-carga-produzida-na-mina-de-S11D.aspx>. Acesso em: 06 ago. 2017.

PRODUÇÃO e vendas da Vale no 4T17. **Vale**, 2017a. Disponível em: [http://www.vale.com/PT/investors/information-market/Press-Releases/ReleaseDocuments/2017%204Q%20Production%20Report\\_p.pdf](http://www.vale.com/PT/investors/information-market/Press-Releases/ReleaseDocuments/2017%204Q%20Production%20Report_p.pdf). Acesso em: 05 mar. 2018.

RAJU, P. M. S. **Infiltration Growth processing of YBCO nano-composites: shape forming, microstructural and magnetic studies**. 2012. Tese (Doctor of Philosophy) - University of Hyderabad, Hyderabad, India, 2012.

RATTANAKAWIN, C; HOGG, R. Aggregate size distributions in flocculation. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 177, n. 2–3, p. 87-98, 2001.

REGATTIERI, Alexandre. **Estudo das Práticas de Preservação e Controles Ambientais da VALE – Porto de Tubarão**. 2010. Monografia (Especialização em Engenharia Portuária) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

RETSCH TECHNOLOGY. **Particle Analyzer CAMSIZER X2**. 1 fotografia. Disponível em: <https://www.retsch-technology.com/products/dynamic-image-analysis/camsizer-x2/function-features/>. Acesso em: 02 fev. 2018.

RICHEFEU, V. **Approche par éléments discrets 3D du comportement de matériaux granulaires cohésifs faiblement contraints**. 2005. Tese (Mécanique [physics.med-ph]) - Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, Français, 2005.

ROSEN, M.J.; KUNJAPPU, J.T. **Surfactants and Interfacial Phenomena**. 4 ed. John Wiley & Sons Inc International Concepts. 2012.

RWE TECHNOLOGY INTERNATIONAL. **Inspection of the Emission Control Measures in the Tubarão Port Complex – Materials Handling Facilities**. Vitória, Vale S.A. – Report External (Project No.: 02319), 2018.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2007. 570p.

SANTOS JR, R. M., AMARANTE MESQUITA, A. L., GEMAQUE, M. L. **Development of an open-circuit low-speed wind tunnel**. *In*: 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Rio de Janeiro, RJ, Brazil. 2015.

SCHULZE, D. **Powders and Bulk solids: Behavior, characterization, storage and Flow**. Germany: Springer. 2008. p. 23-31.

SENADO recebe MP que cria Agência Nacional de Mineração. **Exame**, 23 novembro 2017. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/brasil/senado-recebe-mp-que-cria-agencia-nacional-de-mineracao/>. Acesso em 25 set. 2017.

SEVERO, ELIAS T. D. **Efeito da temperatura e da velocidade do ar na secagem de madeira serrada de pinus elliottii**. 1989. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.



SHAO, Yaping. **Physics and modelling of wind erosion**. 2 ed. Germany: Springer. 2008. p. 131-134.

SOUZA PINTO, T. C., LIMA, O. A., LEAL FILHO, L. S. Sphericity of apatite particles determined by gas permeability through packed beds. **Minerals & Metallurgical Processing**, v. 26, n. 2, p. 105-108, 2009.

SOUZA PINTO, T. C., MORAES JUNIOR, D., LIA, L. R. B., LEAL FILHO, L. S. Mecanismos de Secagem Visando a Redução de Umidade em *Sinter feed* de Minério de Ferro. *In*: 16º SIMPÓSIO DE MINERAÇÃO, 2015, Rio de Janeiro, **Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração**. Rio de Janeiro: ABM Week, v. 45, n.45, p. 1016-1024, 2015.

S11D: maior projeto de minério de ferro da história da Vale. **Testato**. Disponível em: <http://testato.com.br/mineracao/s11d-maior-projeto-de-minerio-de-ferro-da-historia-da-vale/>. Acesso em: 01 jun. 2017.

TAVARES, Bruna Guerreiro. **Problemas ambientais associados à movimentação portuária de minérios, com ênfase em efluentes líquidos**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

TERMINAL da Vale no Maranhão será o maior do mundo em 2018. **Exame**, 06 janeiro 2016. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/negocios/terminal-da-vale-no-maranhao-sera-o-maior-do-mundo-em-2018/>. Acesso em: 25 set. 2017.

TESSUM, M. W. **Effects of spray surfactant and particle charge on respirable dust control**. 2015. Tese (Doctor of Philosophy) – Faculty of the Graduate School, University of Minnesota, Minnesota, 2015.

THOMAZINI, Luis F. V. **Estudo do comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar no interior de um secador solar misto de ventilação natural**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Universidade São Paulo, Piracicaba, 2015.

TIEN, J. C.; KIM, J. Respirable Coal Dust Control Using Surfactants. **Applied Occupational and Environmental Hygiene**, v. 12, n. 12, p. 957-963, 1997. DOI: 10.1080/1047322X.1997.10390635.

Trem de passageiros da estrada de ferro Carajás. **Vale**, 2018a. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/bussiness/logistics/railways/passenger-train-service-carajas/paginas/default.aspx>. Acesso em: 12 jan. 2018.

VALE. **Álbum de Vagões e Carros de Passageiros CVRD – EFVM**. Documento interno, p. 25, 2000.

VALE. **Plano diretor – Usinas da Vale**. Documento interno, 2016a.

VALE apresenta planejamento estratégico para 2017. **Vale**, 2016b. Disponível em: <http://www.vale.com/en/investors/information-market/calendar-ir-news/pages/vale-apresenta-planejamento-estrategico-para-2017.aspx>. Acesso em: 13 mar. 2018.

VALE conclui fechamento do transportador de minério no porto de Tubarão. **Conexão Mineral**, 2017. Disponível em: <http://www.conexaomineral.com.br/noticia/250/vale-conclui-fechamento-do-transportador-de-minerio-no-porto-de-tubarao.html>. Acesso em: 25 set. 2017.

VALE anuncia R\$ 1,27 bi em investimentos para reduzir poeira no ES. **Vale**, 2018b. Disponível em: [https://saladeimprensa.vale.com/Paginas/Releases.aspx?r=Vale\\_anuncia\\_R\\_127\\_bi\\_em\\_investimentos\\_para\\_reduzir\\_poeira\\_no\\_ES&s=Meio\\_Ambiente&RID=2177&SID=2](https://saladeimprensa.vale.com/Paginas/Releases.aspx?r=Vale_anuncia_R_127_bi_em_investimentos_para_reduzir_poeira_no_ES&s=Meio_Ambiente&RID=2177&SID=2). Acesso em: 12 set. 2018.

VÁLIO, Vinícius Mori. **Análise do material particulado atmosférico em uma região de São Carlos – SP**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade São Paulo, São Carlos, 2015.

VIRADOR de vagões do Porto de Ponta da Madeira. **Vale**, 2016c. Disponível em: <https://valeinformar.valeglobal.net/BR/MA/Paginas/Home-07-12-16.aspx?pdf=1#pdf-f3e43fe9-aa79-4041-9e6f-56179522f16f-card-920>, Acesso em: 25 jan. 2018.

WALKER, P. L.; PETERSEN, E. E.; WRIGHT, C. C. Surface active agent phenomena in dust abatement. **Industrial and Engineering Chemistry**. v. 44, p. 2389–2393, 1952.

WANGCHAI, S.; HASTIE, D. B.; WYPYCH, P. W. The simulation of particle flow mechanisms in dustiness testers. *In*: 11th INTERNATIONAL CONFERENCE ON BULK MATERIALS STORAGE, HANDLING AND TRANSPORTATION, 2013, Australia, **Proceedings [...]**. Australia: University of Newcastle, 2013.

WANGCHAI, S.; HASTIE, D. B.; WYPYCH, P. W. The Investigation of Particle Flow Mechanisms of Bulk Materials in Dustiness Testers. **Particulate Science and Technology**, v. 34, n. 2, p. 241-254, 2016, DOI: 10.1080/02726351.2015.1069430.

WU, C.; PENG, X.; WU, G. Wetting agent investigation for controlling dust of lead–zinc ores. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 17, n. 1, p. 159–167. 2007.

XU, G.; CHENA, Y.; EKSTEEN, J.; XU, J. Surfactant-aided coal dust suppression: A review of evaluation methods and influencing factors. **Science of the Total Environment**, v. 639, p. 1060-1076, 2018.

YARIV, S.; CROSS, H. **Geochemistry of colloid systems**. 1 ed. Springer-Verlag, 1979.

YATES, P.; FRANKS, G.; BIGGS, S.; JAMESON, G. Heteroaggregation with nanoparticles: effect of particle size ratio on optimum particle dose. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 255, n. 1-3, p. 85–90, 2005.

ZAMBERLAN, Alexandre de Oliveira. **Sistema multiagente para avaliação do efeito de aglomeração em nanopartículas poliméricas**. 2018. Tese (Doutorado em Nanociências) - Programa de Pós-graduação em Nanociências, Universidade Franciscana, Rio Grande do Sul, 2018.

ZIMON, A. D. **Adhesion of dust and powder**. 2 ed. Plenum Press, New York-London. 1969. p. 81–89.

ZISMAN, W. A. Relation of the equilibrium contact angle to liquid and solid constitution. **Advances in Chemistry**, v. 43, p. 1–51, 1964.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Calibração da Célula de Carga

As tabelas abaixo apresentam os resultados obtidos na calibração da célula de carga do sistema de pesagem de modelo de vagão em túnel de vento.

**Tabela – Calibração da célula de carga – Ensaio 1.**

| Carregamento (g) |        |         |        |         |        | Descarregamento (g) |        |         |        |         |        |
|------------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------------------|--------|---------|--------|---------|--------|
| Balança          | Célula | Balança | Célula | Balança | Célula | Balança             | Célula | Balança | Célula | Balança | Célula |
| 0,00             | 0      | 1653,24 | 1650   | 3354,82 | 3330   | 4955,26             | 4940   | 3304,56 | 3300   | 1602,98 | 1620   |
| 50,05            | 50     | 1703,29 | 1700   | 3404,87 | 3380   | 4905,21             | 4890   | 3254,51 | 3250   | 1552,93 | 1570   |
| 100,10           | 100    | 1753,34 | 1760   | 3454,92 | 3430   | 4855,16             | 4840   | 3204,46 | 3200   | 1502,88 | 1520   |
| 150,15           | 150    | 1803,39 | 1800   | 3504,97 | 3480   | 4805,11             | 4790   | 3154,41 | 3150   | 1452,83 | 1470   |
| 200,20           | 200    | 1853,44 | 1860   | 3555,02 | 3530   | 4755,06             | 4740   | 3104,36 | 3100   | 1402,78 | 1410   |
| 250,25           | 260    | 1953,33 | 1960   | 3605,07 | 3580   | 4705,01             | 4690   | 3004,47 | 3000   | 1352,73 | 1360   |
| 300,30           | 310    | 2004,82 | 1990   | 3655,12 | 3630   | 4654,96             | 4640   | 2955,56 | 2970   | 1302,68 | 1310   |
| 350,35           | 360    | 2054,87 | 2040   | 3705,17 | 3680   | 4604,91             | 4590   | 2905,51 | 2910   | 1252,63 | 1260   |
| 400,40           | 420    | 2104,92 | 2090   | 3755,22 | 3730   | 4554,86             | 4540   | 2855,46 | 2870   | 1202,58 | 1210   |
| 450,45           | 470    | 2154,97 | 2140   | 3805,27 | 3780   | 4504,81             | 4490   | 2805,41 | 2810   | 1152,53 | 1160   |
| 500,50           | 520    | 2205,02 | 2190   | 3855,32 | 3830   | 4454,76             | 4440   | 2755,36 | 2760   | 1102,48 | 1110   |
| 550,55           | 570    | 2255,07 | 2240   | 3955,21 | 3930   | 4404,71             | 4390   | 2705,31 | 2710   | 1002,59 | 1010   |
| 600,60           | 620    | 2305,12 | 2290   | 4004,52 | 4020   | 4354,66             | 4340   | 2655,26 | 2670   | 950,74  | 970    |
| 650,65           | 670    | 2355,17 | 2340   | 4054,57 | 4080   | 4304,61             | 4290   | 2605,21 | 2610   | 900,69  | 920    |
| 700,70           | 720    | 2405,22 | 2390   | 4104,62 | 4130   | 4254,56             | 4240   | 2555,16 | 2560   | 850,64  | 870    |
| 750,75           | 770    | 2455,27 | 2440   | 4154,67 | 4180   | 4204,51             | 4190   | 2505,11 | 2510   | 800,59  | 820    |
| 800,80           | 820    | 2505,32 | 2490   | 4204,72 | 4230   | 4154,46             | 4140   | 2455,06 | 2560   | 750,54  | 770    |
| 850,85           | 870    | 2555,37 | 2540   | 4254,77 | 4280   | 4104,41             | 4090   | 2405,01 | 2410   | 700,49  | 720    |
| 950,74           | 980    | 2605,42 | 2590   | 4304,82 | 4330   | 4004,52             | 3990   | 2354,96 | 2360   | 650,44  | 670    |
| 1002,59          | 1000   | 2655,47 | 2650   | 4354,87 | 4380   | 3955,21             | 3950   | 2304,91 | 2310   | 600,39  | 610    |
| 1052,64          | 1050   | 2705,52 | 2690   | 4404,92 | 4430   | 3905,16             | 3900   | 2254,86 | 2250   | 550,34  | 570    |
| 1102,69          | 1100   | 2755,57 | 2740   | 4454,97 | 4480   | 3855,11             | 3850   | 2204,81 | 2200   | 500,29  | 520    |
| 1152,74          | 1150   | 2805,62 | 2790   | 4505,02 | 4540   | 3805,06             | 3800   | 2154,76 | 2150   | 450,24  | 470    |
| 1202,79          | 1200   | 2855,67 | 2840   | 4555,07 | 4590   | 3755,01             | 3750   | 2104,71 | 2110   | 400,19  | 420    |
| 1252,84          | 1250   | 2955,56 | 2940   | 4605,12 | 4640   | 3704,96             | 3710   | 2004,82 | 2000   | 350,14  | 370    |
| 1302,89          | 1300   | 3004,47 | 2980   | 4655,17 | 4690   | 3654,91             | 3650   | 1953,33 | 1970   | 300,09  | 320    |
| 1352,94          | 1350   | 3054,52 | 3030   | 4705,22 | 4740   | 3604,86             | 3600   | 1903,28 | 1920   | 250,04  | 260    |
| 1402,99          | 1400   | 3104,57 | 3080   | 4755,27 | 4790   | 3554,81             | 3550   | 1853,23 | 1870   | 199,99  | 210    |
| 1453,04          | 1450   | 3154,62 | 3130   | 4805,32 | 4840   | 3504,76             | 3500   | 1803,18 | 1820   | 149,94  | 160    |
| 1503,09          | 1500   | 3204,67 | 3180   | 4855,37 | 4890   | 3454,71             | 3450   | 1753,13 | 1770   | 99,89   | 110    |
| 1553,14          | 1550   | 3254,72 | 3220   | 4955,26 | 4990   | 3404,66             | 3400   | 1703,08 | 1720   | 0,00    | 10     |
| 1603,19          | 1600   | 3304,77 | 3280   |         |        | 3354,61             | 3350   | 1653,03 | 1670   |         |        |

**Tabela – Calibração da célula de carga – Ensaio 2.**

| Carregamento (g) |        |         |        |         |        | Descarregamento (g) |        |         |        |         |        |
|------------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------------------|--------|---------|--------|---------|--------|
| Balança          | Célula | Balança | Célula | Balança | Célula | Balança             | Célula | Balança | Célula | Balança | Célula |
| 0,00             | 10     | 1653,24 | 1640   | 3354,82 | 3320   | 4955,26             | 4940   | 3304,56 | 3360   | 1602,98 | 1630   |
| 50,05            | 50     | 1703,29 | 1690   | 3404,87 | 3370   | 4905,21             | 4890   | 3254,51 | 3310   | 1552,93 | 1590   |
| 100,10           | 100    | 1753,34 | 1740   | 3454,92 | 3420   | 4855,16             | 4840   | 3204,46 | 3250   | 1502,88 | 1530   |
| 150,15           | 150    | 1803,39 | 1790   | 3504,97 | 3470   | 4805,11             | 4790   | 3154,41 | 3210   | 1452,83 | 1480   |
| 200,20           | 200    | 1853,44 | 1840   | 3555,02 | 3520   | 4755,06             | 4740   | 3104,36 | 3160   | 1402,78 | 1430   |
| 250,25           | 250    | 1953,33 | 1940   | 3605,07 | 3560   | 4705,01             | 4690   | 3004,47 | 3060   | 1352,73 | 1380   |
| 300,30           | 300    | 2004,82 | 1980   | 3655,12 | 3620   | 4654,96             | 4640   | 2955,56 | 3020   | 1302,68 | 1320   |
| 350,35           | 350    | 2054,87 | 2030   | 3705,17 | 3670   | 4604,91             | 4590   | 2905,51 | 2970   | 1252,63 | 1270   |
| 400,40           | 400    | 2104,92 | 2080   | 3755,22 | 3720   | 4554,86             | 4540   | 2855,46 | 2920   | 1202,58 | 1220   |
| 450,45           | 450    | 2154,97 | 2130   | 3805,27 | 3770   | 4504,81             | 4490   | 2805,41 | 2860   | 1152,53 | 1170   |
| 500,50           | 500    | 2205,02 | 2170   | 3855,32 | 3820   | 4454,76             | 4440   | 2755,36 | 2810   | 1102,48 | 1120   |
| 550,55           | 550    | 2255,07 | 2230   | 3955,21 | 3910   | 4404,71             | 4390   | 2705,31 | 2760   | 1002,59 | 1020   |
| 600,60           | 600    | 2305,12 | 2280   | 4004,52 | 3950   | 4354,66             | 4340   | 2655,26 | 2710   | 950,74  | 970    |
| 650,65           | 650    | 2355,17 | 2330   | 4054,57 | 4000   | 4304,61             | 4280   | 2605,21 | 2660   | 900,69  | 920    |
| 700,70           | 700    | 2405,22 | 2380   | 4104,62 | 4050   | 4254,56             | 4240   | 2555,16 | 2610   | 850,64  | 870    |
| 750,75           | 750    | 2455,27 | 2430   | 4154,67 | 4100   | 4204,51             | 4190   | 2505,11 | 2560   | 800,59  | 820    |
| 800,80           | 800    | 2505,32 | 2480   | 4204,72 | 4160   | 4154,46             | 4130   | 2455,06 | 2500   | 750,54  | 770    |
| 850,85           | 850    | 2555,37 | 2530   | 4254,77 | 4200   | 4104,41             | 4080   | 2405,01 | 2450   | 700,49  | 720    |
| 950,74           | 950    | 2605,42 | 2580   | 4304,82 | 4250   | 4004,52             | 3990   | 2354,96 | 2400   | 650,44  | 670    |
| 1002,59          | 990    | 2655,47 | 2630   | 4354,87 | 4300   | 3955,21             | 4030   | 2304,91 | 2350   | 600,39  | 620    |
| 1052,64          | 1040   | 2705,52 | 2680   | 4404,92 | 4350   | 3905,16             | 3980   | 2254,86 | 2300   | 550,34  | 570    |
| 1102,69          | 1090   | 2755,57 | 2730   | 4454,97 | 4400   | 3855,11             | 3930   | 2204,81 | 2250   | 500,29  | 520    |
| 1152,74          | 1130   | 2805,62 | 2780   | 4505,02 | 4450   | 3805,06             | 3880   | 2154,76 | 2190   | 450,24  | 470    |
| 1202,79          | 1180   | 2855,67 | 2830   | 4555,07 | 4500   | 3755,01             | 3830   | 2104,71 | 2150   | 400,19  | 420    |
| 1252,84          | 1230   | 2955,56 | 2930   | 4605,12 | 4550   | 3704,96             | 3780   | 2004,82 | 2040   | 350,14  | 360    |
| 1302,89          | 1290   | 3004,47 | 2970   | 4655,17 | 4600   | 3654,91             | 3730   | 1953,33 | 1990   | 300,09  | 320    |
| 1352,94          | 1340   | 3054,52 | 3020   | 4705,22 | 4650   | 3604,86             | 3680   | 1903,28 | 1940   | 250,04  | 260    |
| 1402,99          | 1390   | 3104,57 | 3070   | 4755,27 | 4700   | 3554,81             | 3620   | 1853,23 | 1890   | 199,99  | 210    |
| 1453,04          | 1440   | 3154,62 | 3120   | 4805,32 | 4750   | 3504,76             | 3570   | 1803,18 | 1840   | 149,94  | 160    |
| 1503,09          | 1490   | 3204,67 | 3170   | 4855,37 | 4800   | 3454,71             | 3520   | 1753,13 | 1790   | 99,89   | 110    |
| 1553,14          | 1540   | 3254,72 | 3210   | 4955,26 | 4900   | 3404,66             | 3480   | 1703,08 | 1740   | 0,00    | 10     |
| 1603,19          | 1590   | 3304,77 | 3270   |         |        | 3354,61             | 3410   | 1653,03 | 1690   |         |        |

**Tabela – Calibração da célula de carga – Ensaio 3.**

| Carregamento (g) |        |         |        |         |        | Descarregamento (g) |        |         |        |         |        |
|------------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------------------|--------|---------|--------|---------|--------|
| Balança          | Célula | Balança | Célula | Balança | Célula | Balança             | Célula | Balança | Célula | Balança | Célula |
| 0,00             | 0      | 1653,24 | 1640   | 3354,82 | 3310   | 4955,26             | 4990   | 3304,56 | 3320   | 1602,98 | 1620   |
| 50,05            | 50     | 1703,29 | 1700   | 3404,87 | 3360   | 4905,21             | 4930   | 3254,51 | 3270   | 1552,93 | 1570   |
| 100,10           | 100    | 1753,34 | 1750   | 3454,92 | 3410   | 4855,16             | 4880   | 3204,46 | 3220   | 1502,88 | 1510   |
| 150,15           | 150    | 1803,39 | 1800   | 3504,97 | 3460   | 4805,11             | 4830   | 3154,41 | 3170   | 1452,83 | 1460   |
| 200,20           | 200    | 1853,44 | 1850   | 3555,02 | 3510   | 4755,06             | 4780   | 3104,36 | 3120   | 1402,78 | 1410   |
| 250,25           | 250    | 1953,33 | 1950   | 3605,07 | 3560   | 4705,01             | 4730   | 3004,47 | 3020   | 1352,73 | 1360   |
| 300,30           | 300    | 2004,82 | 1980   | 3655,12 | 3610   | 4654,96             | 4680   | 2955,56 | 2970   | 1302,68 | 1310   |
| 350,35           | 350    | 2054,87 | 2030   | 3705,17 | 3660   | 4604,91             | 4630   | 2905,51 | 2920   | 1252,63 | 1260   |
| 400,40           | 400    | 2104,92 | 2080   | 3755,22 | 3710   | 4554,86             | 4580   | 2855,46 | 2880   | 1202,58 | 1210   |
| 450,45           | 460    | 2154,97 | 2130   | 3805,27 | 3760   | 4504,81             | 4530   | 2805,41 | 2820   | 1152,53 | 1160   |
| 500,50           | 510    | 2205,02 | 2170   | 3855,32 | 3810   | 4454,76             | 4480   | 2755,36 | 2770   | 1102,48 | 1110   |
| 550,55           | 560    | 2255,07 | 2220   | 3955,21 | 3910   | 4404,71             | 4420   | 2705,31 | 2720   | 1002,59 | 1010   |
| 600,60           | 610    | 2305,12 | 2270   | 4004,52 | 3940   | 4354,66             | 4370   | 2655,26 | 2670   | 950,74  | 960    |
| 650,65           | 660    | 2355,17 | 2320   | 4054,57 | 4000   | 4304,61             | 4320   | 2605,21 | 2620   | 900,69  | 910    |
| 700,70           | 710    | 2405,22 | 2380   | 4104,62 | 4040   | 4254,56             | 4270   | 2555,16 | 2580   | 850,64  | 860    |
| 750,75           | 760    | 2455,27 | 2430   | 4154,67 | 4090   | 4204,51             | 4220   | 2505,11 | 2520   | 800,59  | 810    |
| 800,80           | 810    | 2505,32 | 2480   | 4204,72 | 4140   | 4154,46             | 4170   | 2455,06 | 2470   | 750,54  | 760    |
| 850,85           | 860    | 2555,37 | 2530   | 4254,77 | 4190   | 4104,41             | 4120   | 2405,01 | 2420   | 700,49  | 710    |
| 950,74           | 960    | 2605,42 | 2580   | 4304,82 | 4240   | 4004,52             | 4020   | 2354,96 | 2370   | 650,44  | 660    |
| 1002,59          | 990    | 2655,47 | 2630   | 4354,87 | 4290   | 3955,21             | 3980   | 2304,91 | 2310   | 600,39  | 610    |
| 1052,64          | 1040   | 2705,52 | 2670   | 4404,92 | 4340   | 3905,16             | 3930   | 2254,86 | 2260   | 550,34  | 560    |
| 1102,69          | 1090   | 2755,57 | 2720   | 4454,97 | 4390   | 3855,11             | 3880   | 2204,81 | 2210   | 500,29  | 510    |
| 1152,74          | 1140   | 2805,62 | 2770   | 4505,02 | 4440   | 3805,06             | 3830   | 2154,76 | 2160   | 450,24  | 460    |
| 1202,79          | 1190   | 2855,67 | 2830   | 4555,07 | 4490   | 3755,01             | 3780   | 2104,71 | 2110   | 400,19  | 410    |
| 1252,84          | 1240   | 2955,56 | 2920   | 4605,12 | 4540   | 3704,96             | 3730   | 2004,82 | 2010   | 350,14  | 360    |
| 1302,89          | 1290   | 3004,47 | 2960   | 4655,17 | 4560   | 3654,91             | 3690   | 1953,33 | 1970   | 300,09  | 310    |
| 1352,94          | 1340   | 3054,52 | 3010   | 4705,22 | 4640   | 3604,86             | 3630   | 1903,28 | 1920   | 250,04  | 260    |
| 1402,99          | 1390   | 3104,57 | 3060   | 4755,27 | 4700   | 3554,81             | 3580   | 1853,23 | 1870   | 199,99  | 200    |
| 1453,04          | 1450   | 3154,62 | 3110   | 4805,32 | 4750   | 3504,76             | 3530   | 1803,18 | 1820   | 149,94  | 150    |
| 1503,09          | 1500   | 3204,67 | 3160   | 4855,37 | 4790   | 3454,71             | 3480   | 1753,13 | 1770   | 99,89   | 100    |
| 1553,14          | 1550   | 3254,72 | 3210   | 4955,26 | 4890   | 3404,66             | 3430   | 1703,08 | 1720   | 0,00    | 10     |
| 1603,19          | 1600   | 3304,77 | 3260   |         |        | 3354,61             | 3370   | 1653,03 | 1670   |         |        |

## APÊNDICE B – Granulometria das amostras

As tabelas abaixo apresentam os resultados obtidos nos ensaios granulometria dos finos de minério de ferro, finos de pelota tamborada e carvão.

**Tabela – Granulometria dos *pellet feeds*.**

| Abertura da malha | <i>Pellet feed</i> natural |                  |          | <i>Pellet feed</i> moído |                  |          |
|-------------------|----------------------------|------------------|----------|--------------------------|------------------|----------|
|                   | Peso seco                  | Distribuição (%) |          | Peso seco                | Distribuição (%) |          |
| ( $\mu\text{m}$ ) | (gramas)                   | Acumulado        | Passante | (gramas)                 | Acumulado        | Passante |
| 250,00            | 0,74                       | 0,74             | 99,26    | 0,04                     | 0,04             | 99,96    |
| 150,00            | 3,32                       | 4,06             | 95,94    | 0,27                     | 0,31             | 99,69    |
| 106,00            | 6,31                       | 10,37            | 89,63    | 0,70                     | 1,01             | 98,99    |
| 75,00             | 12,03                      | 22,40            | 77,60    | 1,89                     | 2,90             | 97,10    |
| 62,00             | 9,43                       | 31,83            | 68,17    | 3,44                     | 6,34             | 93,66    |
| 45,00             | 18,10                      | 49,93            | 50,07    | 9,32                     | 15,66            | 84,34    |
| 37,00             | 6,81                       | 56,74            | 43,26    | 2,90                     | 18,56            | 81,44    |
| 25,00             | 15,72                      | 72,46            | 27,54    | 12,44                    | 31,00            | 69,00    |
| 15,00             | 14,44                      | 86,90            | 13,10    | 18,36                    | 49,36            | 50,64    |
| 10,00             | 5,02                       | 91,92            | 8,08     | 12,33                    | 61,69            | 38,31    |
| 6,00              | 1,98                       | 93,90            | 6,10     | 9,94                     | 71,63            | 28,37    |
| 5,00              | 0,47                       | 94,37            | 5,63     | 2,56                     | 74,19            | 25,81    |
| 4,00              | 0,63                       | 95,00            | 5,00     | 3,04                     | 77,23            | 22,77    |
| 3,00              | 0,70                       | 95,70            | 4,30     | 3,11                     | 80,34            | 19,66    |
| 2,50              | 0,65                       | 96,35            | 3,65     | 2,86                     | 83,20            | 16,80    |
| 2,00              | 0,73                       | 97,08            | 2,92     | 3,30                     | 86,50            | 13,50    |
| 1,40              | 0,75                       | 97,83            | 2,17     | 3,50                     | 90,00            | 10,00    |
| 1,00              | 0,47                       | 98,30            | 1,70     | 2,30                     | 92,30            | 7,70     |
| 0,70              | 0,33                       | 98,63            | 1,37     | 1,70                     | 94,00            | 6,00     |
| 0,30              | 0,59                       | 99,22            | 0,78     | 3,27                     | 97,27            | 2,73     |
| 0,15              | 0,78                       | 100,00           | 0,00     | 2,73                     | 100,00           | 0,00     |



**Tabela – Granulometria dos finos de pelotas tamboradas.**

| Abertura da malha | Finos de pelotas tamboradas |                  |          |
|-------------------|-----------------------------|------------------|----------|
|                   | Peso seco                   | Distribuição (%) |          |
| ( $\mu\text{m}$ ) | (gramas)                    | Acumulado        | Passante |
| 18000,00          | 1,41                        | 1,41             | 98,59    |
| 16000,00          | 11,53                       | 12,94            | 87,06    |
| 12500,00          | 66,43                       | 79,37            | 20,63    |
| 10000,00          | 12,30                       | 91,67            | 8,33     |
| 8000,00           | 2,72                        | 94,39            | 5,61     |
| 6300,00           | 0,63                        | 95,02            | 4,98     |
| 5000,00           | 0,35                        | 95,37            | 4,63     |
| 4750,00           | 0,18                        | 95,55            | 4,45     |
| 3360,00           | 0,14                        | 95,69            | 4,31     |
| 2350,00           | 0,10                        | 95,79            | 4,21     |
| 1000,00           | 0,12                        | 95,91            | 4,09     |
| 710,00            | 0,03                        | 95,94            | 4,06     |
| 500,00            | 0,02                        | 95,96            | 4,04     |
| 250,00            | 0,04                        | 96,00            | 4,00     |
| 150,00            | 0,05                        | 96,05            | 3,95     |
| 106,00            | 0,06                        | 96,11            | 3,89     |
| 75,00             | 0,12                        | 96,23            | 3,77     |
| 62,00             | 0,18                        | 96,41            | 3,59     |
| 45,00             | 0,36                        | 96,77            | 3,23     |
| 37,00             | 0,12                        | 96,89            | 3,11     |
| 25,00             | 0,49                        | 97,38            | 2,62     |
| 15,00             | 0,79                        | 98,17            | 1,83     |
| 10,00             | 0,58                        | 98,75            | 1,25     |
| 6,00              | 0,46                        | 99,21            | 0,79     |
| 5,00              | 0,10                        | 99,31            | 0,69     |
| 4,00              | 0,11                        | 99,42            | 0,58     |
| 3,20              | 0,10                        | 99,52            | 0,48     |
| 2,60              | 0,08                        | 99,60            | 0,40     |
| 2,00              | 0,08                        | 99,68            | 0,32     |
| 1,40              | 0,07                        | 99,75            | 0,25     |
| 1,00              | 0,04                        | 99,79            | 0,21     |
| 0,70              | 0,02                        | 99,81            | 0,19     |
| 0,30              | 0,04                        | 99,85            | 0,15     |
| 0,15              | 0,15                        | 100,00           | 0,00     |

**Tabela – Granulometria dos carvões.**

| Abertura da malha | Carvão térmico |                  |          | Carvão Coqueificável |                  |          |
|-------------------|----------------|------------------|----------|----------------------|------------------|----------|
|                   | Peso seco      | Distribuição (%) |          | Peso seco            | Distribuição (%) |          |
| ( $\mu\text{m}$ ) | (gramas)       | Acumulado        | Passante | (gramas)             | Acumulado        | Passante |
| 50000             | 634,33         | 2,55             | 97,45    | 782,79               | 3,15             | 96,85    |
| 38000             | 1500,65        | 8,58             | 91,42    | 1023,81              | 7,27             | 92,73    |
| 25000             | 3297,00        | 21,82            | 78,18    | 1669,73              | 14,00            | 86,00    |
| 19000             | 2673,30        | 32,56            | 67,44    | 1353,56              | 19,45            | 80,55    |
| 12700             | 4196,04        | 49,41            | 50,59    | 2770,94              | 30,61            | 69,39    |
| 9500              | 2687,97        | 60,21            | 39,79    | 1182,17              | 35,37            | 64,63    |
| 6300              | 2603,42        | 70,66            | 29,34    | 2380,71              | 44,95            | 55,05    |
| 4760              | 1527,18        | 76,80            | 23,20    | 1442,34              | 50,76            | 49,24    |
| 3350              | 1442,39        | 82,59            | 17,41    | 1481,40              | 56,73            | 43,27    |
| 2000              | 1562,12        | 88,87            | 11,13    | 2289,93              | 65,95            | 34,05    |
| 1000              | 1010,75        | 92,93            | 7,07     | 3718,27              | 80,92            | 19,08    |
| 600               | 418,10         | 94,60            | 5,40     | 1910,27              | 88,61            | 11,39    |
| 425               | 357,99         | 96,04            | 3,96     | 879,15               | 92,15            | 7,85     |
| 250               | 273,26         | 97,14            | 2,86     | 641,75               | 94,74            | 5,26     |
| 125               | 207,33         | 97,97            | 2,03     | 531,32               | 96,88            | 3,12     |
| 53                | 268,83         | 99,05            | 0,95     | 371,02               | 98,37            | 1,63     |
| 45                | 168,45         | 99,73            | 0,27     | 262,17               | 99,43            | 0,57     |
| 20                | 65,86          | 99,99            | 0,01     | 137,21               | 99,98            | 0,02     |
| 15                | 1,59           | 100,00           | 0,00     | 5,44                 | 100,00           | 0,00     |

**Tabela – Granulometria ultrafina das amostras.**

| Abertura da malha<br>( $\mu\text{m}$ ) | Fração ultra fina          |                          |                |
|--|----------------------------|--------------------------|----------------|
|  | Distribuição Passante (%)  |                          |                |
|  | <i>Pellet feed</i> natural | <i>Pellet feed</i> moído | Carvão térmico |
| 1002,37                                | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 893,37                                 | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 796,21                                 | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 709,63                                 | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 632,46                                 | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 563,68                                 | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 502,38                                 | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 447,74                                 | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 399,05                                 | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 355,66                                 | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 316,98                                 | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 282,51                                 | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 251,79                                 | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 224,40                                 | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 200,00                                 | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 178,25                                 | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 158,87                                 | 100,00                     | 100,00                   | 100,00         |
| 141,59                                 | 100,00                     | 100,00                   | 99,98          |
| 126,19                                 | 100,00                     | 100,00                   | 99,93          |
| 112,47                                 | 100,00                     | 100,00                   | 99,68          |
| 100,24                                 | 99,93                      | 100,00                   | 99,10          |
| 89,34                                  | 99,66                      | 99,99                    | 98,07          |
| 79,62                                  | 98,91                      | 99,94                    | 96,49          |
| 70,96                                  | 97,61                      | 99,74                    | 94,27          |
| 63,25                                  | 96,53                      | 99,25                    | 91,34          |
| 56,37                                  | 92,52                      | 98,36                    | 87,70          |
| 50,24                                  | 88,47                      | 96,96                    | 83,40          |
| 44,77                                  | 83,31                      | 94,89                    | 78,51          |
| 39,91                                  | 77,11                      | 92,09                    | 73,18          |
| 35,57                                  | 69,98                      | 88,51                    | 67,55          |
| 31,70                                  | 62,14                      | 84,16                    | 61,77          |
| 28,25                                  | 53,87                      | 79,11                    | 56,00          |
| 25,18                                  | 45,50                      | 73,51                    | 50,36          |
| 22,44                                  | 37,37                      | 67,53                    | 44,96          |
| 20,00                                  | 29,80                      | 61,41                    | 39,88          |
| 17,83                                  | 23,03                      | 55,36                    | 35,18          |
| 15,89                                  | 17,25                      | 49,58                    | 30,89          |
| 14,16                                  | 12,53                      | 44,23                    | 27,02          |
| 12,62                                  | 8,88                       | 39,43                    | 23,57          |
| 11,25                                  | 6,21                       | 35,23                    | 20,51          |
| 10,02                                  | 4,37                       | 31,62                    | 17,82          |
| 8,93                                   | 3,21                       | 28,56                    | 15,47          |
| 7,96                                   | 2,52                       | 25,97                    | 13,42          |
| 7,10                                   | 2,15                       | 23,76                    | 11,64          |
| 6,33                                   | 1,96                       | 21,84                    | 10,09          |
| 5,64                                   | 1,84                       | 20,11                    | 8,74           |

|      |      |       |      |
|------|------|-------|------|
| 5,02 | 1,73 | 18,51 | 7,57 |
| 4,48 | 1,59 | 17,00 | 6,55 |
| 3,99 | 1,40 | 15,53 | 5,66 |
| 3,56 | 1,19 | 14,11 | 4,88 |
| 3,17 | 0,96 | 12,72 | 4,20 |
| 2,83 | 0,74 | 11,39 | 3,61 |
| 2,52 | 0,53 | 10,13 | 3,10 |
| 2,24 | 0,36 | 8,96  | 2,66 |
| 2,00 | 0,22 | 7,87  | 2,29 |
| 1,78 | 0,12 | 6,88  | 1,96 |
| 1,59 | 0,05 | 6,00  | 1,68 |
| 1,42 | 0,00 | 5,23  | 1,46 |
| 1,26 | 0,00 | 4,56  | 1,24 |
| 1,13 | 0,00 | 3,98  | 1,07 |
| 1,00 | 0,00 | 3,49  | 0,92 |
| 0,89 | 0,00 | 3,05  | 0,79 |
| 0,80 | 0,00 | 2,67  | 0,67 |
| 0,71 | 0,00 | 2,33  | 0,57 |
| 0,63 | 0,00 | 2,02  | 0,48 |
| 0,56 | 0,00 | 1,73  | 0,39 |
| 0,50 | 0,00 | 1,45  | 0,31 |
| 0,45 | 0,00 | 1,19  | 0,24 |
| 0,40 | 0,00 | 0,94  | 0,16 |
| 0,36 | 0,00 | 0,71  | 0,10 |
| 0,32 | 0,00 | 0,51  | 0,04 |
| 0,28 | 0,00 | 0,33  | 0,01 |
| 0,25 | 0,00 | 0,18  | 0,00 |
| 0,22 | 0,00 | 0,08  | 0,00 |
| 0,20 | 0,00 | 0,01  | 0,00 |
| 0,18 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,15 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,14 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,13 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,11 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,10 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,09 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,08 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,07 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,06 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,06 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,05 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,05 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,04 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,04 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,03 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,03 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,03 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,02 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |
| 0,02 | 0,00 | 0,00  | 0,00 |

## APÊNDICE C – Massa Específica Aparente em Função da Umidade

As tabelas abaixo apresentam os resultados obtidos nos ensaios de massa específica aparente vs umidade do material.

**Tabela – Massa Específica Aparente – *Pellet feed* natural.**

| <i>Pellet feed</i> Natural - Ensaio 1 |                        |                |             |                |                           |                             |                                 |
|---------------------------------------|------------------------|----------------|-------------|----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Umidade de referência (%)             | Verificação de umidade |                |             |                | Massa específica aparente |                             |                                 |
|                                       | Massa úmida (g)        | Massa seca (g) | Umidade (%) | Incertezas (%) | Massa úmida (g)           | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Incertezas (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 1%                                    | 167,59                 | 165,74         | 1,10        | 0,00839        | 1739,60                   | 1,74                        | 0,00052                         |
| 2%                                    | 146,84                 | 143,70         | 2,14        | 0,00953        | 1447,41                   | 1,45                        | 0,00043                         |
| 3%                                    | 159,55                 | 154,66         | 3,06        | 0,00873        | 1393,14                   | 1,39                        | 0,00042                         |
| 4%                                    | 133,26                 | 128,02         | 3,93        | 0,01041        | 1388,61                   | 1,39                        | 0,00042                         |
| 5%                                    | 87,45                  | 83,05          | 5,03        | 0,01577        | 1327,16                   | 1,33                        | 0,00040                         |
| 6%                                    | 119,62                 | 112,49         | 5,96        | 0,01148        | 1334,25                   | 1,33                        | 0,00040                         |
| 7%                                    | 138,34                 | 128,79         | 6,90        | 0,00988        | 1448,58                   | 1,45                        | 0,00043                         |
| 8%                                    | 147,65                 | 135,75         | 8,06        | 0,00920        | 1472,31                   | 1,47                        | 0,00044                         |
| 9%                                    | 124,54                 | 113,43         | 8,92        | 0,01086        | 1561,63                   | 1,56                        | 0,00047                         |
| 10%                                   | 135,32                 | 121,95         | 9,88        | 0,00995        | 1650,58                   | 1,65                        | 0,00050                         |
| 11%                                   | 114,59                 | 102,02         | 10,97       | 0,01168        | 1788,14                   | 1,79                        | 0,00054                         |
| 12%                                   | 157,15                 | 138,72         | 11,73       | 0,00849        | 1623,79                   | 1,62                        | 0,00049                         |
| 13%                                   | 132,97                 | 115,47         | 13,16       | 0,00996        | 1500,98                   | 1,50                        | 0,00045                         |

| <i>Pellet feed</i> Natural - Ensaio 2 |                        |                |             |                |                           |                             |                                 |
|---------------------------------------|------------------------|----------------|-------------|----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Umidade de referência (%)             | Verificação de umidade |                |             |                | Massa específica aparente |                             |                                 |
|                                       | Massa úmida (g)        | Massa seca (g) | Umidade (%) | Incertezas (%) | Massa úmida (g)           | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Incertezas (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 1%                                    | 167,59                 | 165,74         | 1,10        | 0,00839        | 1707,06                   | 1,71                        | 0,00051                         |
| 2%                                    | 146,84                 | 143,70         | 2,14        | 0,00953        | 1425,01                   | 1,43                        | 0,00043                         |
| 3%                                    | 159,55                 | 154,66         | 3,06        | 0,00873        | 1366,65                   | 1,37                        | 0,00041                         |
| 4%                                    | 133,26                 | 128,02         | 3,93        | 0,01041        | 1388,88                   | 1,39                        | 0,00042                         |
| 5%                                    | 87,45                  | 83,05          | 5,03        | 0,01577        | 1304,93                   | 1,30                        | 0,00039                         |
| 6%                                    | 119,62                 | 112,49         | 5,96        | 0,01148        | 1358,54                   | 1,36                        | 0,00041                         |
| 7%                                    | 138,34                 | 128,79         | 6,90        | 0,00988        | 1442,00                   | 1,44                        | 0,00043                         |
| 8%                                    | 147,65                 | 135,75         | 8,06        | 0,00920        | 1480,31                   | 1,48                        | 0,00044                         |
| 9%                                    | 124,54                 | 113,43         | 8,92        | 0,01086        | 1522,97                   | 1,52                        | 0,00046                         |
| 10%                                   | 135,32                 | 121,95         | 9,88        | 0,00995        | 1632,79                   | 1,63                        | 0,00049                         |
| 11%                                   | 114,59                 | 102,02         | 10,97       | 0,01168        | 1824,93                   | 1,82                        | 0,00055                         |
| 12%                                   | 157,15                 | 138,72         | 11,73       | 0,00849        | 1573,41                   | 1,57                        | 0,00047                         |
| 13%                                   | 132,97                 | 115,47         | 13,16       | 0,00996        | 1506,63                   | 1,51                        | 0,00045                         |

| <i>Pellet feed Natural - Ensaio 3</i> |                        |                |             |                |                           |                             |                                 |
|---------------------------------------|------------------------|----------------|-------------|----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Umidade de referência (%)             | Verificação de umidade |                |             |                | Massa específica aparente |                             |                                 |
|                                       | Massa úmida (g)        | Massa seca (g) | Umidade (%) | Incertezas (%) | Massa úmida (g)           | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Incertezas (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 1%                                    | 167,59                 | 165,74         | 1,10        | 0,00839        | 1738,61                   | 1,74                        | 0,00052                         |
| 2%                                    | 146,84                 | 143,70         | 2,14        | 0,00953        | 1428,62                   | 1,43                        | 0,00043                         |
| 3%                                    | 159,55                 | 154,66         | 3,06        | 0,00873        | 1360,24                   | 1,36                        | 0,00041                         |
| 4%                                    | 133,26                 | 128,02         | 3,93        | 0,01041        | 1358,56                   | 1,36                        | 0,00041                         |
| 5%                                    | 87,45                  | 83,05          | 5,03        | 0,01577        | 1330,88                   | 1,33                        | 0,00040                         |
| 6%                                    | 119,62                 | 112,49         | 5,96        | 0,01148        | 1363,50                   | 1,36                        | 0,00041                         |
| 7%                                    | 138,34                 | 128,79         | 6,90        | 0,00988        | 1451,41                   | 1,45                        | 0,00044                         |
| 8%                                    | 147,65                 | 135,75         | 8,06        | 0,00920        | 1477,87                   | 1,48                        | 0,00044                         |
| 9%                                    | 124,54                 | 113,43         | 8,92        | 0,01086        | 1567,94                   | 1,57                        | 0,00047                         |
| 10%                                   | 135,32                 | 121,95         | 9,88        | 0,00995        | 1629,67                   | 1,63                        | 0,00049                         |
| 11%                                   | 114,59                 | 102,02         | 10,97       | 0,01168        | 1805,10                   | 1,81                        | 0,00054                         |
| 12%                                   | 157,15                 | 138,72         | 11,73       | 0,00849        | 1588,51                   | 1,59                        | 0,00048                         |
| 13%                                   | 132,97                 | 115,47         | 13,16       | 0,00996        | 1482,37                   | 1,48                        | 0,00044                         |

**Tabela – Massa específica aparente vs umidade do material – *Pellet feed* moído.**

| <i>Pellet feed Moído - Ensaio 1</i> |                        |                |             |                |                           |                             |                                 |
|-------------------------------------|------------------------|----------------|-------------|----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Umidade de referência (%)           | Verificação de umidade |                |             |                | Massa específica aparente |                             |                                 |
|                                     | Massa úmida (g)        | Massa seca (g) | Umidade (%) | Incertezas (%) | Massa úmida (g)           | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Incertezas (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 1%                                  | 136,76                 | 135,07         | 1,24        | 0,01028        | 1701,85                   | 1,70                        | 0,00051                         |
| 2%                                  | 150,10                 | 146,68         | 2,28        | 0,00932        | 1654,03                   | 1,65                        | 0,00050                         |
| 3%                                  | 91,55                  | 88,73          | 3,08        | 0,01521        | 1635,72                   | 1,64                        | 0,00049                         |
| 4%                                  | 138,31                 | 132,45         | 4,24        | 0,01001        | 1489,50                   | 1,49                        | 0,00045                         |
| 5%                                  | 94,32                  | 89,66          | 4,94        | 0,01463        | 1462,33                   | 1,46                        | 0,00044                         |
| 6%                                  | 103,01                 | 96,92          | 5,91        | 0,01333        | 1379,84                   | 1,38                        | 0,00041                         |
| 7%                                  | 135,33                 | 125,86         | 7,00        | 0,01009        | 1473,09                   | 1,47                        | 0,00044                         |
| 8%                                  | 97,67                  | 89,81          | 8,05        | 0,01391        | 1522,28                   | 1,52                        | 0,00046                         |
| 9%                                  | 131,44                 | 119,73         | 8,91        | 0,01029        | 1601,66                   | 1,60                        | 0,00048                         |
| 10%                                 | 127,76                 | 114,70         | 10,22       | 0,01052        | 1745,28                   | 1,75                        | 0,00052                         |
| 11%                                 | 138,86                 | 123,35         | 11,17       | 0,00963        | 1925,57                   | 1,93                        | 0,00058                         |
| 12%                                 | 131,93                 | 116,00         | 12,07       | 0,01009        | 2149,56                   | 2,15                        | 0,00064                         |
| 13%                                 | 91,74                  | 79,84          | 12,97       | 0,01445        | 2344,56                   | 2,34                        | 0,00070                         |
| 14%                                 | 243,84                 | 209,36         | 14,14       | 0,00541        | 2829,74                   | 2,83                        | 0,00085                         |
| 15%                                 | 130,77                 | 111,34         | 14,86       | 0,01004        | 2827,36                   | 2,83                        | 0,00085                         |
| 16%                                 | 272,78                 | 230,68         | 15,43       | 0,00480        | 2764,72                   | 2,76                        | 0,00083                         |

| <i>Pellet feed</i> Moído - Ensaio 2 |                        |                |             |                |                           |                             |                                 |
|-------------------------------------|------------------------|----------------|-------------|----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Umidade de referência (%)           | Verificação de umidade |                |             |                | Massa específica aparente |                             |                                 |
|                                     | Massa úmida (g)        | Massa seca (g) | Umidade (%) | Incertezas (%) | Massa úmida (g)           | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Incertezas (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 1%                                  | 136,76                 | 135,07         | 1,24        | 0,01028        | 1711,56                   | 1,71                        | 0,00051                         |
| 2%                                  | 150,10                 | 146,68         | 2,28        | 0,00932        | 1644,60                   | 1,64                        | 0,00049                         |
| 3%                                  | 91,55                  | 88,73          | 3,08        | 0,01521        | 1566,36                   | 1,57                        | 0,00047                         |
| 4%                                  | 138,31                 | 132,45         | 4,24        | 0,01001        | 1451,34                   | 1,45                        | 0,00044                         |
| 5%                                  | 94,32                  | 89,66          | 4,94        | 0,01463        | 1408,21                   | 1,41                        | 0,00042                         |
| 6%                                  | 103,01                 | 96,92          | 5,91        | 0,01333        | 1381,88                   | 1,38                        | 0,00041                         |
| 7%                                  | 135,33                 | 125,86         | 7,00        | 0,01009        | 1466,89                   | 1,47                        | 0,00044                         |
| 8%                                  | 97,67                  | 89,81          | 8,05        | 0,01391        | 1515,34                   | 1,52                        | 0,00045                         |
| 9%                                  | 131,44                 | 119,73         | 8,91        | 0,01029        | 1568,83                   | 1,57                        | 0,00047                         |
| 10%                                 | 127,76                 | 114,70         | 10,22       | 0,01052        | 1773,30                   | 1,77                        | 0,00053                         |
| 11%                                 | 138,86                 | 123,35         | 11,17       | 0,00963        | 1904,74                   | 1,90                        | 0,00057                         |
| 12%                                 | 131,93                 | 116,00         | 12,07       | 0,01009        | 2127,40                   | 2,13                        | 0,00064                         |
| 13%                                 | 91,74                  | 79,84          | 12,97       | 0,01445        | 2332,50                   | 2,33                        | 0,00070                         |
| 14%                                 | 243,84                 | 209,36         | 14,14       | 0,00541        | 2827,79                   | 2,83                        | 0,00085                         |
| 15%                                 | 130,77                 | 111,34         | 14,86       | 0,01004        | 2814,29                   | 2,81                        | 0,00084                         |
| 16%                                 | 272,78                 | 230,68         | 15,43       | 0,00480        | 2750,53                   | 2,75                        | 0,00083                         |

| <i>Pellet feed</i> Moído - Ensaio 3 |                        |                |             |                |                           |                             |                                 |
|-------------------------------------|------------------------|----------------|-------------|----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Umidade de referência (%)           | Verificação de umidade |                |             |                | Massa específica aparente |                             |                                 |
|                                     | Massa úmida (g)        | Massa seca (g) | Umidade (%) | Incertezas (%) | Massa úmida (g)           | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Incertezas (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 1%                                  | 136,76                 | 135,07         | 1,24        | 0,01028        | 1729,19                   | 1,73                        | 0,00052                         |
| 2%                                  | 150,10                 | 146,68         | 2,28        | 0,00932        | 1666,34                   | 1,67                        | 0,00050                         |
| 3%                                  | 91,55                  | 88,73          | 3,08        | 0,01521        | 1600,30                   | 1,60                        | 0,00048                         |
| 4%                                  | 138,31                 | 132,45         | 4,24        | 0,01001        | 1666,34                   | 1,67                        | 0,00050                         |
| 5%                                  | 94,32                  | 89,66          | 4,94        | 0,01463        | 1442,14                   | 1,44                        | 0,00043                         |
| 6%                                  | 103,01                 | 96,92          | 5,91        | 0,01333        | 1379,32                   | 1,38                        | 0,00041                         |
| 7%                                  | 135,33                 | 125,86         | 7,00        | 0,01009        | 1477,37                   | 1,48                        | 0,00044                         |
| 8%                                  | 97,67                  | 89,81          | 8,05        | 0,01391        | 1533,96                   | 1,53                        | 0,00046                         |
| 9%                                  | 131,44                 | 119,73         | 8,91        | 0,01029        | 1543,75                   | 1,54                        | 0,00046                         |
| 10%                                 | 127,76                 | 114,70         | 10,22       | 0,01052        | 1724,37                   | 1,72                        | 0,00052                         |
| 11%                                 | 138,86                 | 123,35         | 11,17       | 0,00963        | 1905,90                   | 1,91                        | 0,00057                         |
| 12%                                 | 131,93                 | 116,00         | 12,07       | 0,01009        | 2144,26                   | 2,14                        | 0,00064                         |
| 13%                                 | 91,74                  | 79,84          | 12,97       | 0,01445        | 2333,43                   | 2,33                        | 0,00070                         |
| 14%                                 | 243,84                 | 209,36         | 14,14       | 0,00541        | 2829,89                   | 2,83                        | 0,00085                         |
| 15%                                 | 130,77                 | 111,34         | 14,86       | 0,01004        | 2806,14                   | 2,81                        | 0,00084                         |
| 16%                                 | 272,78                 | 230,68         | 15,43       | 0,00480        | 2754,60                   | 2,75                        | 0,00083                         |

## APÊNDICE D – Perda de Massa Total em Ensaios de Arrasto Eólico

As tabelas abaixo apresentam os resultados obtidos nos ensaios de arrasto eólico de minério de ferro em modelo de vagão.

**Tabela – Perda de massa, umidade relativa do ar e temperatura do ensaio de arrasto eólico em túnel de vento para o pellet feed natural a 6% de umidade.**

| Velocidade |             | 40 km/h   |       |                |       |        | 70 km/h   |       |                |       |        |
|------------|-------------|-----------|-------|----------------|-------|--------|-----------|-------|----------------|-------|--------|
| Ensaio     | Tempo (min) | Massa (g) | P (%) | Incertezas (%) | H (%) | T (°C) | Massa (g) | P (%) | Incertezas (%) | H (%) | T (°C) |
| 1          | 0           | 5900      | 0,00  | 0,1198         | 53,2  | 33,8   | 5900      | 0,00  | 0,1198         | 45,8  | 33,1   |
|            | 10          | 5830      | 1,19  | 0,1191         | 55,1  | 32,5   | 5520      | 6,44  | 0,1161         | 43,3  | 33,3   |
|            | 20          | 5840      | 1,02  | 0,1192         | 55,6  | 33,1   | 5250      | 11,02 | 0,1134         | 39,7  | 34,8   |
|            | 30          | 5815      | 1,44  | 0,1190         | 51,8  | 33,6   | 4970      | 15,76 | 0,1108         | 38,7  | 35,3   |
|            | 40          | 5800      | 1,69  | 0,1188         | 50,1  | 33,7   | 4695      | 20,42 | 0,1083         | 38,3  | 35,8   |
|            | 50          | 5770      | 2,20  | 0,1185         | 48,6  | 33,9   | 4440      | 24,75 | 0,1061         | 36,6  | 35,6   |
|            | 60          | 5740      | 2,71  | 0,1182         | 47,0  | 34,3   | 4175      | 29,24 | 0,1038         | 37,6  | 35,1   |
|            | 70          | 5715      | 3,14  | 0,1180         | 47,8  | 34,1   | 3920      | 33,56 | 0,1017         | 35,7  | 36,3   |
|            | 80          | 5705      | 3,31  | 0,1179         | 47,7  | 34,4   | 3650      | 38,14 | 0,0997         | 36,3  | 36,6   |
|            | 90          | 5700      | 3,39  | 0,1178         | 46,7  | 35,0   | 3380      | 42,71 | 0,0977         | 35,9  | 36,5   |
| 2          | 0           | 5900      | 0,00  | 0,1198         | 45,9  | 35,4   | 5900      | 0,00  | 0,1198         | 35,1  | 36,5   |
|            | 10          | 5830      | 1,19  | 0,1191         | 45,7  | 35,1   | 5615      | 4,83  | 0,1170         | 34,2  | 36,5   |
|            | 20          | 5750      | 2,54  | 0,1183         | 46,1  | 35,1   | 5380      | 8,81  | 0,1147         | 36,7  | 37,1   |
|            | 30          | 5705      | 3,31  | 0,1179         | 46,5  | 34,6   | 5090      | 13,73 | 0,1119         | 35,2  | 36,8   |
|            | 40          | 5660      | 4,07  | 0,1174         | 47,2  | 33,8   | 4870      | 17,46 | 0,1099         | 39,9  | 36,1   |
|            | 50          | 5720      | 3,05  | 0,1180         | 48,8  | 3,7    | 4655      | 21,10 | 0,1079         | 41,6  | 34,9   |
|            | 60          | 5560      | 5,76  | 0,1164         | 49,2  | 33,9   | 4390      | 25,59 | 0,1056         | 39,3  | 35,6   |
|            | 70          | 5520      | 6,44  | 0,1161         | 48,0  | 33,8   | 4135      | 29,92 | 0,1035         | 38,3  | 35,8   |
|            | 80          | 5470      | 7,29  | 0,1156         | 48,8  | 33,8   | 3825      | 35,17 | 0,1010         | 38,8  | 35,8   |
|            | 90          | 5435      | 7,88  | 0,1152         | 48,7  | 33,7   | 3545      | 39,92 | 0,0989         | 40,0  | 35,4   |
| 3          | 0           | 5900      | 0,00  | 0,1198         | 48,8  | 33,6   | 5900      | 0,00  | 0,1198         | 39,3  | 35,7   |
|            | 10          | 5860      | 0,68  | 0,1194         | 40,1  | 33,6   | 4640      | 21,36 | 0,1078         | 40,1  | 35,2   |
|            | 20          | 5805      | 1,61  | 0,1189         | 49,4  | 33,4   | 5340      | 9,49  | 0,1143         | 39,6  | 35,1   |
|            | 30          | 5760      | 2,37  | 0,1184         | 48,8  | 33,3   | 5080      | 13,90 | 0,1118         | 41,0  | 34,7   |
|            | 40          | 5700      | 3,39  | 0,1178         | 49,8  | 33,0   | 4785      | 18,90 | 0,1091         | 41,0  | 34,7   |
|            | 50          | 5630      | 4,58  | 0,1171         | 50,8  | 33,8   | 4485      | 23,98 | 0,1065         | 41,5  | 34,5   |
|            | 60          | 5545      | 6,02  | 0,1163         | 51,6  | 33,5   | 4265      | 27,71 | 0,1046         | 42,2  | 34,3   |
|            | 70          | 5490      | 6,95  | 0,1158         | 50,6  | 33,6   | 3985      | 32,46 | 0,1023         | 14,9  | 34,3   |
|            | 80          | 5445      | 7,71  | 0,1153         | 50,4  | 32,2   | 3740      | 36,61 | 0,1003         | 42,0  | 34,1   |
|            | 90          | 5390      | 8,64  | 0,1148         | 51,4  | 31,6   | 3495      | 40,76 | 0,0985         | 41,5  | 33,9   |



**Tabela – Perda de massa, umidade relativa do ar e temperatura do ensaio de arrasto eólico em túnel de vento para pellet feed natural a 8% de umidade.**

| Velocidade |             | 40 km/h   |       |                |       |        | 70 km/h   |       |                |       |        |
|------------|-------------|-----------|-------|----------------|-------|--------|-----------|-------|----------------|-------|--------|
| Ensaio     | Tempo (min) | Massa (g) | P (%) | Incertezas (%) | H (%) | T (°C) | Massa (g) | P (%) | Incertezas (%) | H (%) | T (°C) |
| 1          | 0           | 5910      | 0,00  | 0,1196         | 44,8  | 36,6   | 5910      | 0,00  | 0,1196         | 0,5   | 34,1   |
|            | 15          | 5870      | 0,68  | 0,1192         | 46,6  | 36,0   | 5750      | 2,71  | 0,1180         | 0,5   | 33,8   |
|            | 30          | 5800      | 1,86  | 0,1185         | 47,4  | 35,8   | 5620      | 4,91  | 0,1167         | 0,5   | 33,5   |
|            | 45          | 5760      | 2,54  | 0,1181         | 47,1  | 35,5   | 5500      | 6,94  | 0,1156         | 0,5   | 33,2   |
|            | 60          | 5720      | 3,21  | 0,1177         | 47,0  | 35,3   | 5380      | 8,97  | 0,1144         | 0,6   | 32,9   |
|            | 75          | 5690      | 3,72  | 0,1174         | 48,6  | 34,5   | 5220      | 11,68 | 0,1129         | 0,6   | 31,5   |
|            | 90          | 5650      | 4,40  | 0,1170         | 49,4  | 34,4   | 5160      | 12,69 | 0,1123         | 0,7   | 31,2   |
| 2          | 0           | 5910      | 0,00  | 0,1196         | 51,0  | 35,4   | 5910      | 0,00  | 0,1196         | 0,5   | 33,9   |
|            | 15          | 5885      | 0,42  | 0,1194         | 50,0  | 35,5   | 5650      | 4,40  | 0,1170         | 0,5   | 33,9   |
|            | 30          | 5850      | 1,02  | 0,1190         | 48,2  | 35,4   | 5400      | 8,63  | 0,1146         | 0,5   | 33,7   |
|            | 45          | 5820      | 1,52  | 0,1187         | 46,6  | 35,5   | 5200      | 12,01 | 0,1127         | 0,5   | 33,1   |
|            | 60          | 5800      | 1,86  | 0,1185         | 45,5  | 35,5   | 5020      | 15,06 | 0,1110         | 0,6   | 32,3   |
|            | 75          | 5775      | 2,28  | 0,1183         | 49,7  | 34,4   | 4950      | 16,24 | 0,1104         | 0,7   | 30,6   |
|            | 90          | 5760      | 2,54  | 0,1181         | 47,9  | 34,0   | 4900      | 17,09 | 0,1099         | 0,7   | 30,5   |
| 3          | 0           | 5910      | 0,00  | 0,1196         | 45,4  | 35,8   | 5910      | 0,00  | 0,1196         | 0,5   | 34,1   |
|            | 15          | 5865      | 0,76  | 0,1192         | 45,5  | 35,3   | 5745      | 2,79  | 0,1180         | 0,5   | 33,9   |
|            | 30          | 5820      | 1,52  | 0,1187         | 47,2  | 35,0   | 5550      | 6,09  | 0,1161         | 0,5   | 33,7   |
|            | 45          | 5785      | 2,12  | 0,1184         | 46,2  | 35,2   | 5350      | 9,48  | 0,1141         | 0,5   | 33,2   |
|            | 60          | 5760      | 2,54  | 0,1181         | 48,0  | 35,2   | 5140      | 13,03 | 0,1121         | 0,5   | 32,9   |
|            | 75          | 5725      | 3,13  | 0,1178         | 49,5  | 34,3   | 4960      | 16,07 | 0,1104         | 0,6   | 32,7   |
|            | 90          | 5695      | 3,64  | 0,1175         | 48,2  | 34,4   | 4760      | 19,46 | 0,1086         | 0,6   | 32,5   |

**Tabela – Perda de massa, umidade relativa do ar e temperatura do ensaio de arrasto eólico em túnel de vento para pellet feed natural a 12% de umidade.**

| Velocidade |             | 40 km/h   |       |                |       |        | 70 km/h   |       |                |       |        |
|------------|-------------|-----------|-------|----------------|-------|--------|-----------|-------|----------------|-------|--------|
| Ensaio     | Tempo (min) | Massa (g) | P (%) | Incertezas (%) | H (%) | T (°C) | Massa (g) | P (%) | Incertezas (%) | H (%) | T (°C) |
| 1          | 0           | 6160      | 0,00  | 0,1148         | 58,5  | 31,5   | 6160      | 0,00  | 0,1148         | 50,7  | 34,3   |
|            | 15          | 6130      | 0,49  | 0,1145         | 61,8  | 32,3   | 6100      | 0,01  | 0,1142         | 54,8  | 33,9   |
|            | 30          | 6110      | 0,81  | 0,1143         | 62,4  | 31,2   | 6050      | 0,02  | 0,1138         | 55,1  | 33,6   |
|            | 45          | 6100      | 0,97  | 0,1142         | 58,3  | 31,4   | 6015      | 0,02  | 0,1134         | 57,7  | 33,4   |
|            | 60          | 6080      | 1,30  | 0,1140         | 59,9  | 31,5   | 5985      | 0,03  | 0,1132         | 62,3  | 32,9   |
|            | 75          | 6055      | 1,70  | 0,1138         | 63,2  | 31,4   | 5965      | 0,03  | 0,1130         | 64,3  | 31,5   |
|            | 90          | 6035      | 2,03  | 0,1136         | 63,8  | 31,4   | 5950      | 0,03  | 0,1129         | 65,7  | 30,8   |
| 2          | 0           | 6160      | 0,00  | 0,1148         | 48,8  | 34,4   | 6160      | 0,00  | 0,1148         | 54,8  | 34,1   |
|            | 15          | 6135      | 0,41  | 0,1146         | 49,9  | 34,3   | 6110      | 0,01  | 0,1143         | 56,7  | 33,8   |
|            | 30          | 6105      | 0,89  | 0,1143         | 50,0  | 35,5   | 6080      | 0,01  | 0,1140         | 57,8  | 33,9   |
|            | 45          | 6080      | 1,30  | 0,1140         | 50,1  | 34,2   | 6045      | 0,02  | 0,1137         | 58,4  | 34,0   |
|            | 60          | 6060      | 1,62  | 0,1139         | 49,8  | 34,3   | 6015      | 0,02  | 0,1134         | 58,4  | 34,1   |
|            | 75          | 6030      | 2,11  | 0,1136         | 43,4  | 36,6   | 5970      | 0,03  | 0,1130         | 58,5  | 34,1   |
|            | 90          | 6005      | 2,52  | 0,1134         | 50,2  | 34,5   | 5940      | 0,04  | 0,1128         | 62,0  | 32,8   |

**Tabela – Perda de massa, umidade relativa do ar e temperatura do ensaio de arrasto eólico em túnel de vento para o pellet feed moído a 6% de umidade.**

| Velocidade |             | 40 km/h   |       |                |       |        | 70 km/h   |       |                |       |        |
|------------|-------------|-----------|-------|----------------|-------|--------|-----------|-------|----------------|-------|--------|
| Ensaio     | Tempo (min) | Massa (g) | P (%) | Incertezas (%) | H (%) | T (°C) | Massa (g) | P (%) | Incertezas (%) | H (%) | T (°C) |
| 1          | 0           | 5900      | 0,00  | 0,1198         | 43,9  | 33,0   | 5900      | 0,00  | 0,1198         | 55,9  | 33,8   |
|            | 10          | 5855      | 0,76  | 0,1194         | 46,2  | 32,4   | 5760      | 2,37  | 0,1184         | 54,1  | 34,1   |
|            | 20          | 5830      | 1,19  | 0,1191         | 63,1  | 33,4   | 5650      | 4,24  | 0,1173         | 53,4  | 34,2   |
|            | 30          | 5810      | 1,53  | 0,1189         | 41,2  | 34,1   | 5535      | 6,19  | 0,1162         | 53,1  | 34,1   |
|            | 40          | 5800      | 1,69  | 0,1188         | 44,7  | 33,2   | 5415      | 8,22  | 0,1150         | 47,6  | 34,2   |
|            | 50          | 5790      | 1,86  | 0,1187         | 44,0  | 33,4   | 5295      | 10,25 | 0,1139         | 46,1  | 34,4   |
|            | 60          | 5785      | 1,95  | 0,1187         | 42,0  | 34,0   | 5200      | 11,86 | 0,1130         | 46,2  | 35,3   |
|            | 70          | 5775      | 2,12  | 0,1186         | 40,0  | 34,4   | 5110      | 13,39 | 0,1121         | 46,3  | 35,4   |
|            | 80          | 5765      | 2,29  | 0,1185         | 37,4  | 35,2   | 5030      | 14,75 | 0,1114         | 41,8  | 36,4   |
|            | 90          | 5760      | 2,37  | 0,1184         | 35,6  | 35,3   | 4950      | 16,10 | 0,1106         | 44,7  | 35,9   |
| 2          | 0           | 5900      | 0,00  | 0,1198         | 35,9  | 35,5   | 5900      | 0,00  | 0,1198         | 43,1  | 36,7   |
|            | 10          | 5830      | 1,19  | 0,1191         | 33,8  | 35,9   | 5690      | 3,56  | 0,1177         | 46,1  | 35,2   |
|            | 20          | 5795      | 1,78  | 0,1188         | 33,3  | 36,2   | 5510      | 6,61  | 0,1160         | 46,6  | 35,2   |
|            | 30          | 5780      | 2,03  | 0,1186         | 33,3  | 36,2   | 5386      | 8,71  | 0,1147         | 42,2  | 35,5   |
|            | 40          | 5775      | 2,12  | 0,1186         | 33,0  | 36,4   | 5310      | 10,00 | 0,1140         | 39,0  | 35,1   |
|            | 50          | 5760      | 2,37  | 0,1184         | 33,5  | 36,3   | 5170      | 12,37 | 0,1127         | 44,2  | 35,2   |
|            | 60          | 5755      | 2,46  | 0,1184         | 34,6  | 36,1   | 5100      | 13,56 | 0,1120         | 44,2  | 34,9   |
|            | 70          | 5750      | 2,54  | 0,1183         | 32,1  | 36,9   | 4960      | 15,93 | 0,1107         | 52,2  | 33,5   |
|            | 80          | 5740      | 2,71  | 0,1182         | 32,7  | 37,0   | 4890      | 17,12 | 0,1101         | 53,4  | 30,5   |
|            | 90          | 5735      | 2,80  | 0,1182         | 32,6  | 36,8   | 4790      | 18,81 | 0,1092         | 54,2  | 30,5   |
| 3          | 0           | 5900      | 0,00  | 0,1198         | 32,3  | 36,8   | 5900      | 0,00  | 0,1198         | 48,6  | 33,4   |
|            | 10          | 5850      | 0,85  | 0,1193         | 32,6  | 36,5   | 5750      | 2,54  | 0,1183         | 48,3  | 35,1   |
|            | 20          | 5835      | 1,10  | 0,1192         | 33,5  | 36,6   | 5610      | 4,92  | 0,1169         | 45,9  | 36,0   |
|            | 30          | 5820      | 1,36  | 0,1190         | 34,5  | 36,2   | 5490      | 6,95  | 0,1158         | 48,6  | 34,6   |
|            | 40          | 5805      | 1,61  | 0,1189         | 35,1  | 36,3   | 5415      | 8,22  | 0,1150         | 55,0  | 33,7   |
|            | 50          | 5800      | 1,69  | 0,1188         | 38,4  | 35,4   | 5340      | 9,49  | 0,1143         | 64,2  | 33,8   |
|            | 60          | 5795      | 1,78  | 0,1188         | 39,9  | 35,1   | 5260      | 10,85 | 0,1135         | 63,2  | 33,9   |
|            | 70          | 5785      | 1,95  | 0,1187         | 38,9  | 34,5   | 5160      | 12,54 | 0,1126         | 55,4  | 33,5   |
|            | 80          | 5775      | 2,12  | 0,1186         | 39,0  | 34,4   | 5040      | 14,58 | 0,1115         | 53,7  | 34,1   |
|            | 90          | 5740      | 2,71  | 0,1182         | 39,4  | 34,4   | 4940      | 16,27 | 0,1105         | 55,8  | 35,6   |

**Tabela – Perda de massa, umidade relativa do ar e temperatura do ensaio de arrasto eólico em túnel de vento para o pellet feed moído a 8% de umidade.**

| Velocidade |             | 40 km/h   |       |                |       |        | 70 km/h   |       |                |       |        |
|------------|-------------|-----------|-------|----------------|-------|--------|-----------|-------|----------------|-------|--------|
| Ensaio     | Tempo (min) | Massa (g) | P (%) | Incertezas (%) | H (%) | T (°C) | Massa (g) | P (%) | Incertezas (%) | H (%) | T (°C) |
| 1          | 0           | 6100      | 0,00  | 0,1159         | 57,6  | 32,8   | 6100      | 0,00  | 0,1159         | 49,5  | 35,1   |
|            | 10          | 6080      | 0,33  | 0,1157         | 55,4  | 33,5   | 6000      | 1,64  | 0,1150         | 50,9  | 34,3   |
|            | 20          | 6065      | 0,57  | 0,1156         | 52,3  | 34,2   | 5930      | 2,79  | 0,1143         | 50,8  | 34,6   |
|            | 30          | 6055      | 0,74  | 0,1155         | 51,1  | 34,6   | 5890      | 3,44  | 0,1139         | 50,3  | 34,3   |
|            | 40          | 6045      | 0,90  | 0,1154         | 52,6  | 34,4   | 5860      | 3,93  | 0,1137         | 50,2  | 34,4   |
|            | 50          | 6040      | 0,98  | 0,1154         | 51,4  | 34,7   | 5835      | 4,34  | 0,1134         | 49,4  | 35,0   |
|            | 60          | 6030      | 1,15  | 0,1153         | 52,0  | 34,3   | 5800      | 4,92  | 0,1131         | 50,4  | 34,3   |
|            | 70          | 6025      | 1,23  | 0,1152         | 53,3  | 34,1   | 5780      | 5,25  | 0,1129         | 50,7  | 34,1   |
|            | 80          | 6020      | 1,31  | 0,1152         | 52,6  | 32,2   | 5760      | 5,57  | 0,1127         | 51,7  | 33,8   |
|            | 90          | 6015      | 1,39  | 0,1151         | 50,8  | 34,7   | 5745      | 5,82  | 0,1126         | 50,4  | 34,3   |
| 2          | 0           | 6100      | 0,00  | 0,1159         | 56,8  | 33,6   | 6100      | 0,00  | 0,1159         | 39,3  | 36,0   |
|            | 10          | 6085      | 0,25  | 0,1158         | 56,3  | 34,1   | 6005      | 1,56  | 0,1150         | 39,4  | 35,8   |
|            | 20          | 6075      | 0,41  | 0,1157         | 56,0  | 34,2   | 5960      | 2,30  | 0,1146         | 42,4  | 35,2   |
|            | 30          | 6065      | 0,57  | 0,1156         | 59,3  | 33,2   | 5930      | 2,79  | 0,1143         | 43,5  | 34,9   |
|            | 40          | 6060      | 0,66  | 0,1155         | 65,7  | 31,6   | 5885      | 3,52  | 0,1139         | 45,3  | 34,2   |
|            | 50          | 6050      | 0,82  | 0,1154         | 58,5  | 33,1   | 5855      | 4,02  | 0,1136         | 45,5  | 34,3   |
|            | 60          | 6040      | 0,98  | 0,1154         | 55,5  | 33,6   | 5825      | 4,51  | 0,1133         | 45,5  | 34,2   |
|            | 70          | 6035      | 1,07  | 0,1153         | 54,8  | 33,6   | 5810      | 4,75  | 0,1132         | 50,4  | 33,1   |
|            | 80          | 6025      | 1,23  | 0,1152         | 55,5  | 33,5   | 5785      | 5,16  | 0,1130         | 52,3  | 33,0   |
|            | 90          | 6020      | 1,31  | 0,1152         | 53,7  | 33,6   | 5745      | 5,82  | 0,1126         | 52,3  | 34,1   |
| 3          | 0           | 6100      | 0,00  | 0,1159         | 45,2  | 35,2   | 6100      | 0,00  | 0,1159         | 52,3  | 33,5   |
|            | 10          | 6090      | 0,16  | 0,1158         | 46,4  | 34,6   | 6005      | 1,56  | 0,1150         | 55,3  | 32,6   |
|            | 20          | 6075      | 0,41  | 0,1157         | 46,0  | 34,7   | 5965      | 2,21  | 0,1146         | 55,4  | 32,5   |
|            | 30          | 6065      | 0,57  | 0,1156         | 46,2  | 34,6   | 5940      | 2,62  | 0,1144         | 55,2  | 32,6   |
|            | 40          | 6055      | 0,74  | 0,1155         | 46,0  | 34,8   | 5910      | 3,11  | 0,1141         | 55,5  | 31,5   |
|            | 50          | 6045      | 0,90  | 0,1154         | 45,3  | 34,7   | 5880      | 3,61  | 0,1138         | 56,7  | 31,1   |
|            | 60          | 6040      | 0,98  | 0,1154         | 45,5  | 34,9   | 5860      | 3,93  | 0,1137         | 55,9  | 31,4   |
|            | 70          | 6035      | 1,07  | 0,1153         | 45,5  | 34,7   | 5835      | 4,34  | 0,1134         | 55,4  | 31,5   |
|            | 80          | 6030      | 1,15  | 0,1153         | 46,0  | 34,5   | 5805      | 4,84  | 0,1132         | 56,5  | 31,2   |
|            | 90          | 6025      | 1,23  | 0,1152         | 46,5  | 34,4   | 5760      | 5,57  | 0,1127         | 55,9  | 31,3   |

**Tabela – Perda de massa, umidade relativa do ar e temperatura do ensaio de arrasto eólico em túnel de vento para o pellet feed moído a 12% de umidade.**

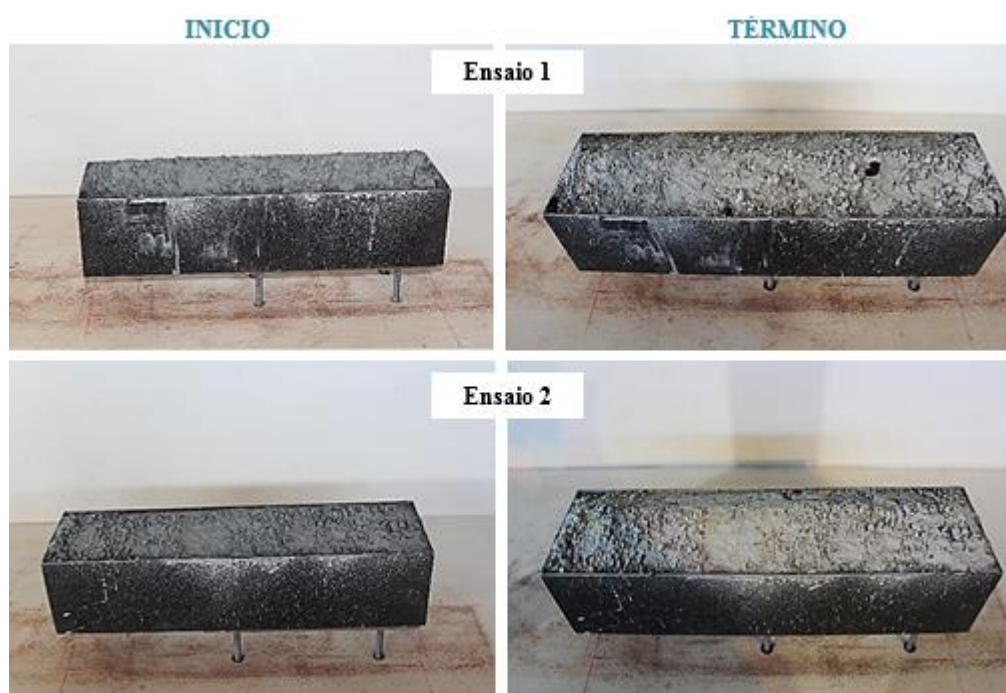
| Velocidade |             | 40 km/h   |       |                |       |        | 70 km/h   |       |                |       |        |
|------------|-------------|-----------|-------|----------------|-------|--------|-----------|-------|----------------|-------|--------|
| Ensaio     | Tempo (min) | Massa (g) | P (%) | Incertezas (%) | H (%) | T (°C) | Massa (g) | P (%) | Incertezas (%) | H (%) | T (°C) |
| 1          | 0           | 12160     | 0,00  | 0,0582         | 47,5  | 34,1   | 12160     | 0,00  | 0,0582         | 42,8  | 33,4   |
|            | 10          | 12140     | 0,16  | 0,0581         | 45,7  | 33,2   | 12110     | 0,41  | 0,0580         | 44,2  | 32,9   |
|            | 20          | 12115     | 0,37  | 0,0580         | 44,5  | 33,5   | 12060     | 0,82  | 0,0579         | 42,6  | 33,9   |
|            | 30          | 12090     | 0,58  | 0,0580         | 46,7  | 33,5   | 12010     | 1,23  | 0,0578         | 42,6  | 32,7   |
|            | 40          | 12065     | 0,78  | 0,0579         | 43,0  | 33,9   | 11970     | 1,56  | 0,0577         | 43,5  | 32,6   |
|            | 50          | 12040     | 0,99  | 0,0579         | 43,7  | 33,4   | 11930     | 1,89  | 0,0576         | 43,7  | 32,5   |
|            | 60          | 12005     | 1,27  | 0,0578         | 43,9  | 33,7   | 11890     | 2,22  | 0,0575         | 44,4  | 32,3   |
|            | 70          | 11985     | 1,44  | 0,0577         | 42,5  | 33,7   | 11845     | 2,59  | 0,0574         | 45,7  | 32,2   |
|            | 80          | 11955     | 1,69  | 0,0577         | 44,5  | 33,4   | 11820     | 2,80  | 0,0573         | 46,2  | 32,0   |
|            | 90          | 11930     | 1,89  | 0,0576         | 42,2  | 33,6   | 11770     | 3,21  | 0,0572         | 47,7  | 31,6   |
| 2          | 0           | 12160     | 0,00  | 0,0582         | 53,6  | 32,8   | 12160     | 0,00  | 0,0582         | 54,4  | 33,4   |
|            | 10          | 12140     | 0,16  | 0,0581         | 52,2  | 33,2   | 12110     | 0,41  | 0,0580         | 55,7  | 32,9   |
|            | 20          | 12115     | 0,37  | 0,0580         | 51,9  | 33,7   | 12085     | 0,62  | 0,0580         | 56,6  | 32,6   |
|            | 30          | 12095     | 0,53  | 0,0580         | 52,0  | 33,5   | 12055     | 0,86  | 0,0579         | 58,4  | 32,1   |
|            | 40          | 12080     | 0,66  | 0,0580         | 54,1  | 33,0   | 12010     | 1,23  | 0,0578         | 55,6  | 32,4   |
|            | 50          | 12065     | 0,78  | 0,0579         | 52,8  | 32,9   | 11980     | 1,48  | 0,0577         | 54,8  | 32,5   |
|            | 60          | 12040     | 0,99  | 0,0579         | 53,5  | 32,6   | 11945     | 1,77  | 0,0576         | 54,3  | 32,9   |
|            | 70          | 12015     | 1,19  | 0,0578         | 53,2  | 32,5   | 11910     | 2,06  | 0,0576         | 55,5  | 32,8   |
|            | 80          | 12005     | 1,27  | 0,0578         | 53,7  | 32,3   | 11875     | 2,34  | 0,0575         | 54,6  | 32,8   |
|            | 90          | 11980     | 1,48  | 0,0577         | 55,4  | 31,7   | 11835     | 2,67  | 0,0574         | 54,9  | 32,6   |
| 3          | 0           | 12160     | 0,00  | 0,0582         | 50,1  | 33,7   | 12160     | 0,00  | 0,0582         | 47,5  | 34,9   |
|            | 10          | 12125     | 0,29  | 0,0581         | 50,7  | 34,0   | 12095     | 0,53  | 0,0580         | 48,1  | 34,5   |
|            | 20          | 12090     | 0,58  | 0,0580         | 50,7  | 33,6   | 12055     | 0,86  | 0,0579         | 47,1  | 34,6   |
|            | 30          | 12070     | 0,74  | 0,0579         | 52,8  | 33,5   | 12000     | 1,32  | 0,0578         | 46,1  | 34,8   |
|            | 40          | 12040     | 0,99  | 0,0579         | 53,5  | 33,3   | 11960     | 1,64  | 0,0577         | 45,5  | 34,7   |
|            | 50          | 12020     | 1,15  | 0,0578         | 53,7  | 33,7   | 11910     | 2,06  | 0,0576         | 46,0  | 35,0   |
|            | 60          | 12000     | 1,32  | 0,0578         | 52,9  | 32,9   | 11875     | 2,34  | 0,0575         | 45,8  | 34,7   |
|            | 70          | 11975     | 1,52  | 0,0577         | 53,4  | 32,7   | 11830     | 2,71  | 0,0574         | 47,3  | 35,0   |
|            | 80          | 11950     | 1,73  | 0,0577         | 53,9  | 32,4   | 11790     | 3,04  | 0,0573         | 46,6  | 34,8   |
|            | 90          | 11930     | 1,89  | 0,0576         | 54,1  | 32,2   | 11740     | 3,45  | 0,0572         | 46,4  | 34,5   |

## APÊNDICE E – Efeito dos Produtos Químicos de Cobertura

As tabelas e figuras a seguir mostram os resultados de perda de massa total em túnel de vento com a aplicação de produtos químicos de cobertura de leito de minério em vagões de trem e o aspecto da superfície do material em modelo de vagão, no início e término de cada ensaio.

**Tabela – Perda de massa total, temperatura e umidade relativa do ar: Supressor Celulósico.**

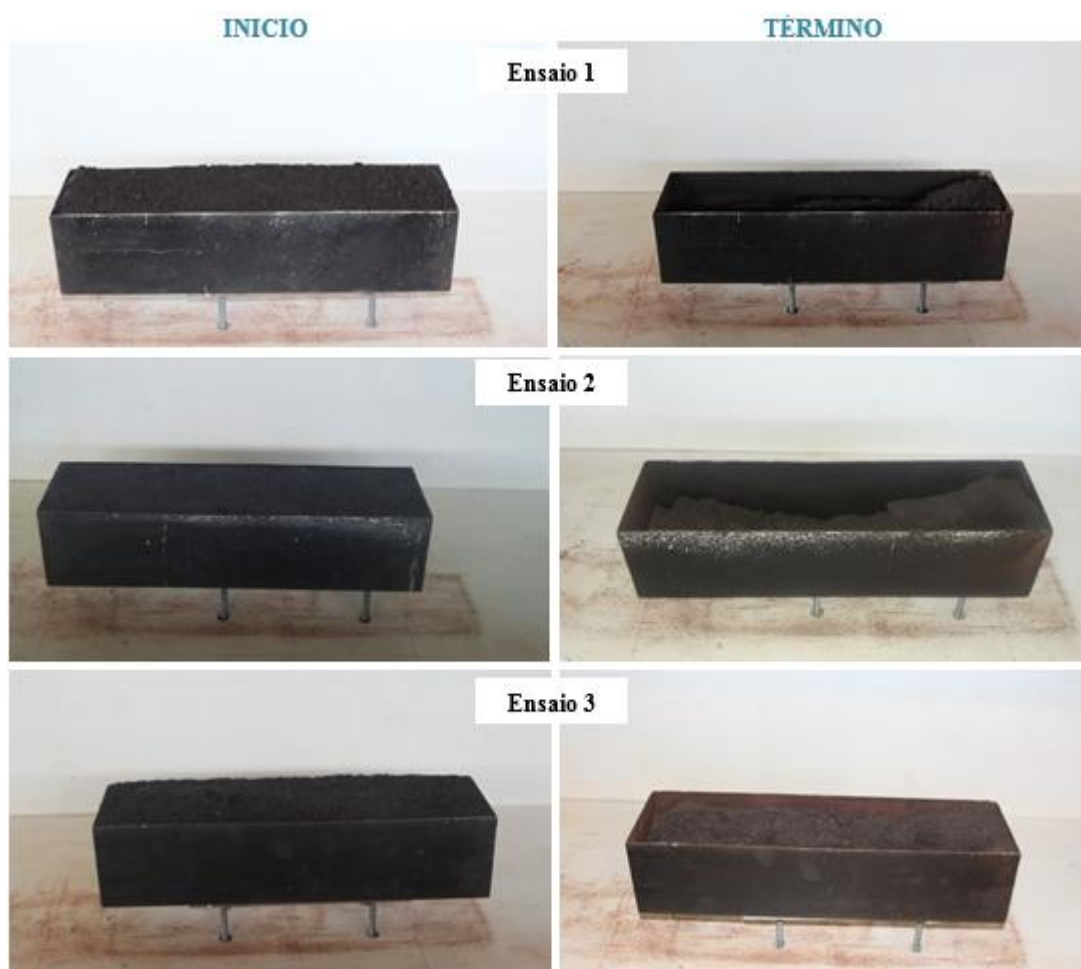
| Ensaio | 1     |        |        | 2     |        |        | 3   |        |        | Média |        |
|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|---|--------|--------|-------|--------|
|        | P (%) | UR (%) | T (°C) | P (%) | UR (%) | T (°C) | P (%)   | UR (%) | T (°C) | P (%) | UR (%) |
| 0      | 0,00  | 65,0   | 32,3   | 0,00  | 59,9   | 33,4   | <b>Quantidade<br/>insuficiente<br/>de produto</b> | 0,00   | 62,45  |       |        |
| 1      | 0,96  | 69,1   | 31,4   | 1,02  | 61,6   | 33,0   |   | 0,99   | 65,35  |       |        |
| 2      | 1,58  | 69,2   | 33,9   | 1,69  | 57,9   | 33,5   |   | 1,64   | 63,55  |       |        |
| 3      | 1,99  | 53,0   | 35,5   | 2,03  | 53,9   | 35,0   |   | 2,01   | 53,45  |       |        |
| 4      | 2,06  | 78,1   | 28,6   | 2,37  | 60,2   | 33,8   |   | 2,22   | 69,15  |       |        |
| 5      | 2,06  | 89,2   | 26,5   | 2,44  | 76,4   | 29,3   |   | 2,25   | 82,80  |       |        |
| 6      | 2,20  | 83,2   | 28,1   | 2,51  | 87,0   | 28,1   |   | 2,35   | 85,10  |       |        |



**Figura – Aspecto do leito de minério de ferro no início e término dos ensaios: Supressor Celulósico.**

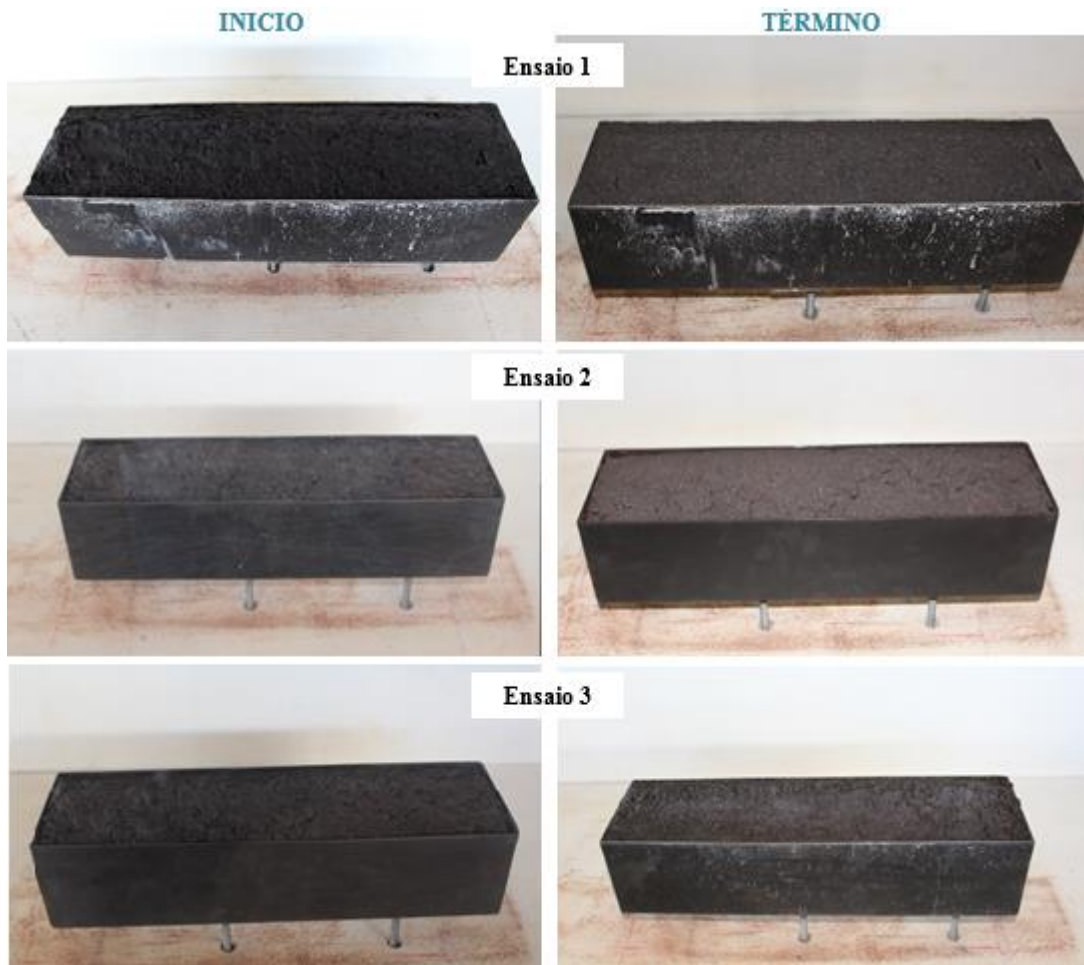
**Tabela – Perda de massa total, temperatura e umidade relativa do ar: Sem supressor.**

| Ensaio | 1     |        |        | 2     |        |        | 3     |        |        | Média |        |
|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
|        | P (%) | UR (%) | T (°C) | P (%) | UR (%) | T (°C) | P (%) | UR (%) | T (°C) | P (%) | UR (%) |
| 0      | 0,00  | 76,9   | 29,1   | 0,00  | 68,4   | 30,7   | 0,00  | 73,6   | 30,0   | 0,00  | 73,0   |
| 1      | 2,88  | 68,0   | 31,2   | 7,01  | 63,3   | 31,6   | 3,50  | 69,9   | 30,7   | 4,46  | 67,1   |
| 2      | 8,46  | 60,5   | 33,0   | 16,06 | 61,7   | 32,2   | 9,47  | 68,8   | 30,9   | 11,33 | 63,7   |
| 3      | 15,71 | 59,3   | 33,4   | 29,84 | 64,7   | 31,0   | 14,88 | 75,9   | 28,3   | 20,14 | 66,6   |
| 4      | 24,13 | 59,1   | 32,6   | 35,33 | 55,5   | 32,0   | 16,86 | 88,0   | 26,5   | 25,44 | 67,5   |
| 5      | 32,08 | 61,0   | 32,6   | 45,96 | 59,3   | 31,7   | 19,78 | 84,5   | 27,4   | 32,61 | 68,3   |
| 6      | 37,27 | 71,8   | 30,5   | 53,77 | 74,3   | 30,3   | 22,70 | 86,9   | 27,3   | 37,91 | 77,7   |

**Figura – Aspecto do leito de minério de ferro no início e término dos ensaios: Sem supressor.**

**Tabela – Perda de massa total, temperatura e umidade relativa do ar: Água pura.**

| Ensaio | 1        |           |           | 2        |           |           | 3        |           |           | Média    |           |
|--------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|
|        | P<br>(%) | UR<br>(%) | T<br>(°C) | P<br>(%) | UR<br>(%) | T<br>(°C) | P<br>(%) | UR<br>(%) | T<br>(°C) | P<br>(%) | UR<br>(%) |
| 0      | 0,00     | 57,1      | 33,6      | 0,00     | 58,8      | 33,7      | 0,00     | 83,8      | 27,4      | 0,00     | 66,57     |
| 1      | 1,34     | 58,8      | 33,6      | 1,08     | 66,0      | 32,4      | 0,89     | 63,3      | 33,0      | 1,10     | 62,70     |
| 2      | 2,01     | 54,3      | 34,7      | 2,03     | 58,7      | 34,0      | 1,74     | 64,5      | 32,6      | 1,93     | 59,17     |
| 3      | 2,42     | 52,9      | 34,6      | 2,16     | 83,1      | 26,9      | 2,22     | 65,7      | 32,6      | 2,27     | 67,23     |
| 4      | 2,75     | 57,3      | 34,0      | 2,37     | 90,1      | 26,7      | 2,52     | 66,4      | 32,0      | 2,55     | 71,27     |
| 5      | 2,89     | 66,9      | 31,5      | 2,57     | 82,6      | 27,3      | 2,76     | 68,4      | 30,7      | 2,74     | 72,63     |
| 6      | 2,96     | 75,8      | 27,6      | 2,70     | 88,3      | 27,2      | 2,91     | 85,8      | 29,1      | 2,86     | 83,30     |

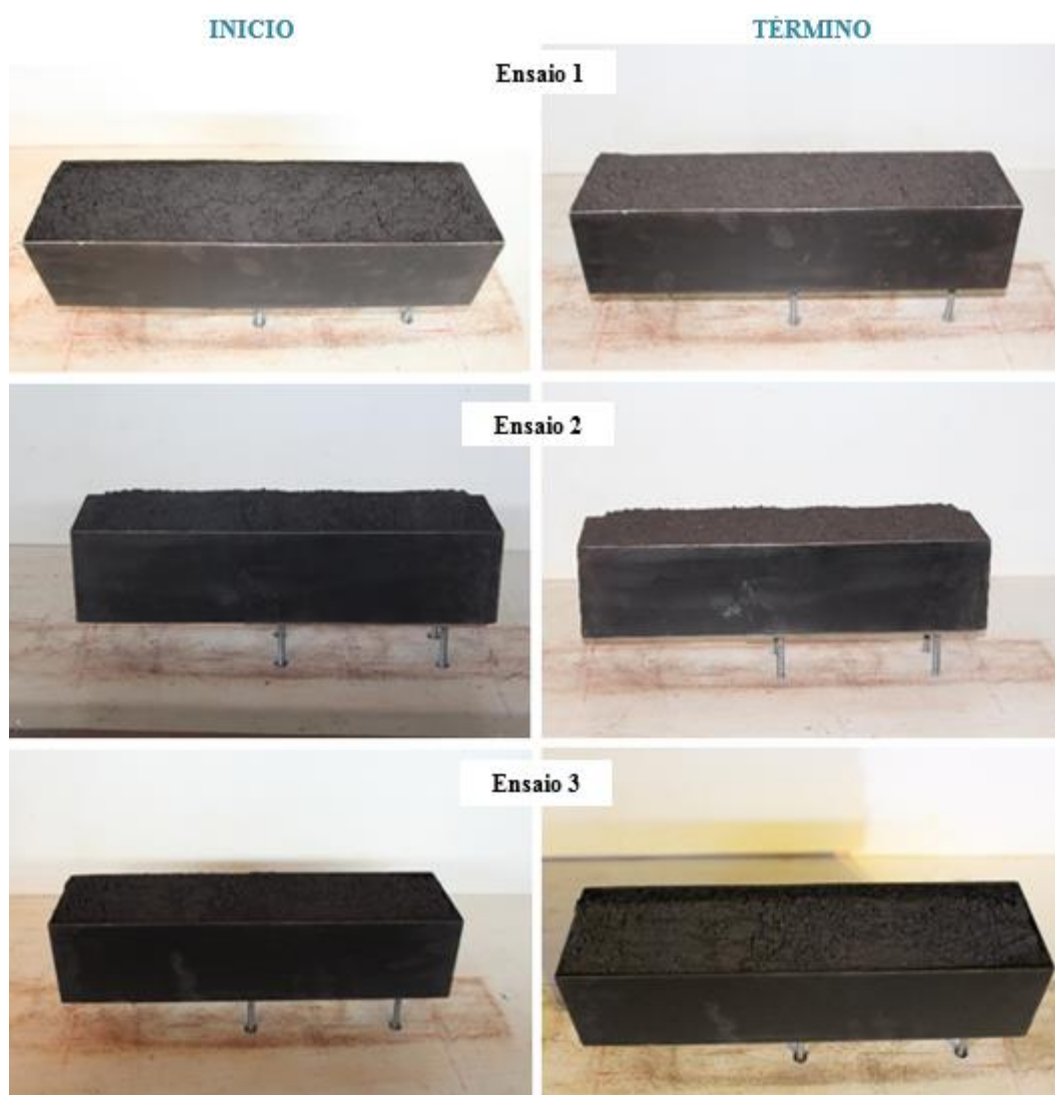


**Figura – Aspecto do leito de minério de ferro no início e término dos ensaios: Água pura.**



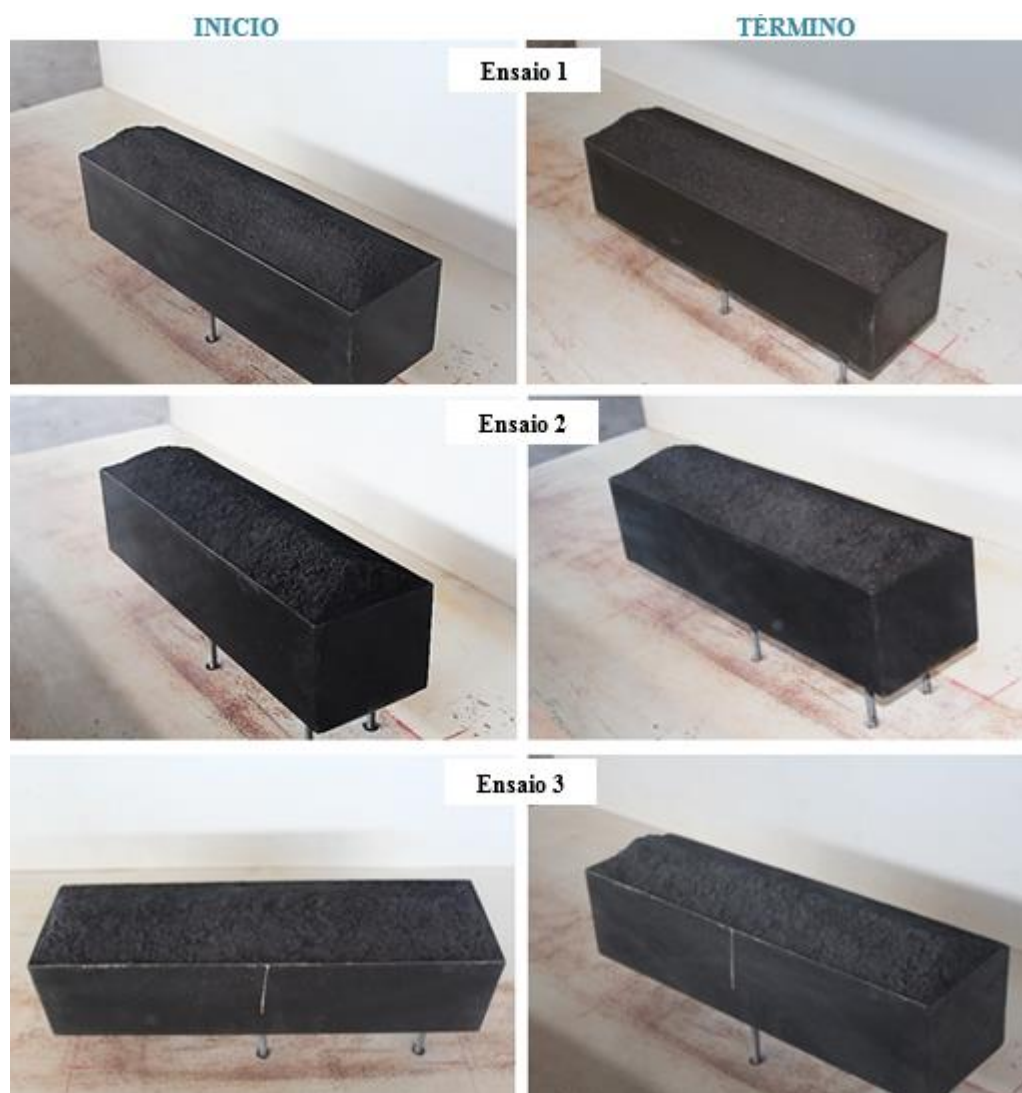
**Tabela – Perda de massa total, temperatura e umidade relativa do ar: Supressor FPM.**

| Ensaio | 1     |        |        | 2     |        |        | 3     |        |        | Média |        |
|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
|        | P (%) | UR (%) | T (°C) | P (%) | UR (%) | T (°C) | P (%) | UR (%) | T (°C) | P (%) | UR (%) |
| 0      | 0,00  | 64,4   | 32,6   | 0,00  | 60,8   | 32,3   | 0,00  | 59,3   | 33,7   | 0,00  | 61,50  |
| 1      | 0,82  | 64,6   | 32,2   | 1,02  | 57,2   | 32,4   | 0,82  | 66,9   | 30,6   | 0,89  | 62,90  |
| 2      | 1,57  | 64,3   | 32,9   | 1,50  | 62,9   | 31,2   | 1,44  | 69,0   | 31,2   | 1,50  | 65,40  |
| 3      | 1,84  | 66,7   | 32,0   | 1,84  | 65,0   | 31,3   | 1,78  | 73,2   | 30,1   | 1,82  | 68,30  |
| 4      | 2,25  | 64,2   | 32,3   | 2,04  | 61,6   | 31,8   | 1,98  | 74,4   | 30,1   | 2,09  | 66,73  |
| 5      | 2,31  | 86,7   | 26,9   | 2,24  | 62,9   | 31,0   | 2,19  | 85,1   | 28,8   | 2,25  | 78,23  |
| 6      | 2,31  | 88,1   | 26,3   | 2,38  | 80,8   | 28,7   | 2,26  | 87,5   | 27,5   | 2,32  | 85,47  |

**Figura – Aspecto do leito de minério de ferro no início e término dos ensaios: Supressor FPM.**

**Tabela – Perda de massa total, temperatura e umidade relativa do ar: Supressor Fitosoil.**

| Ensaio | 1     |        |        | 2     |        |        | 3     |        |        | Média |        |
|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
|        | P (%) | UR (%) | T (°C) | P (%) | UR (%) | T (°C) | P (%) | UR (%) | T (°C) | P (%) | UR (%) |
| 0      | 0,00  | 62,8   | 32,8   | 0,00  | 71,9   | 30,0   | 0,00  | 73,1   | 30,8   | 0,00  | 69,27  |
| 1      | 0,97  | 59,3   | 33,2   | 0,90  | 67,4   | 30,7   | 0,88  | 69,8   | 30,9   | 0,92  | 65,50  |
| 2      | 1,60  | 62,7   | 32,1   | 1,52  | 62,8   | 32,6   | 1,55  | 64,6   | 32,5   | 1,56  | 63,37  |
| 3      | 1,94  | 62,6   | 32,7   | 2,00  | 58,5   | 33,2   | 2,09  | 59,5   | 34,1   | 2,01  | 60,20  |
| 4      | 2,22  | 61,5   | 32,7   | 2,28  | 54,9   | 34,4   | 2,43  | 62,0   | 32,8   | 2,31  | 59,47  |
| 5      | 2,50  | 57,3   | 33,3   | 2,55  | 57,2   | 33,9   | 2,57  | 61,9   | 33,5   | 2,54  | 58,80  |
| 6      | 2,50  | 70,1   | 30,1   | 2,76  | 63,0   | 33,2   | 2,77  | 65,1   | 31,9   | 2,68  | 66,07  |



**Figura – Aspecto do leito de minério de ferro no início e término dos ensaios: Supressor Fitosoil.**

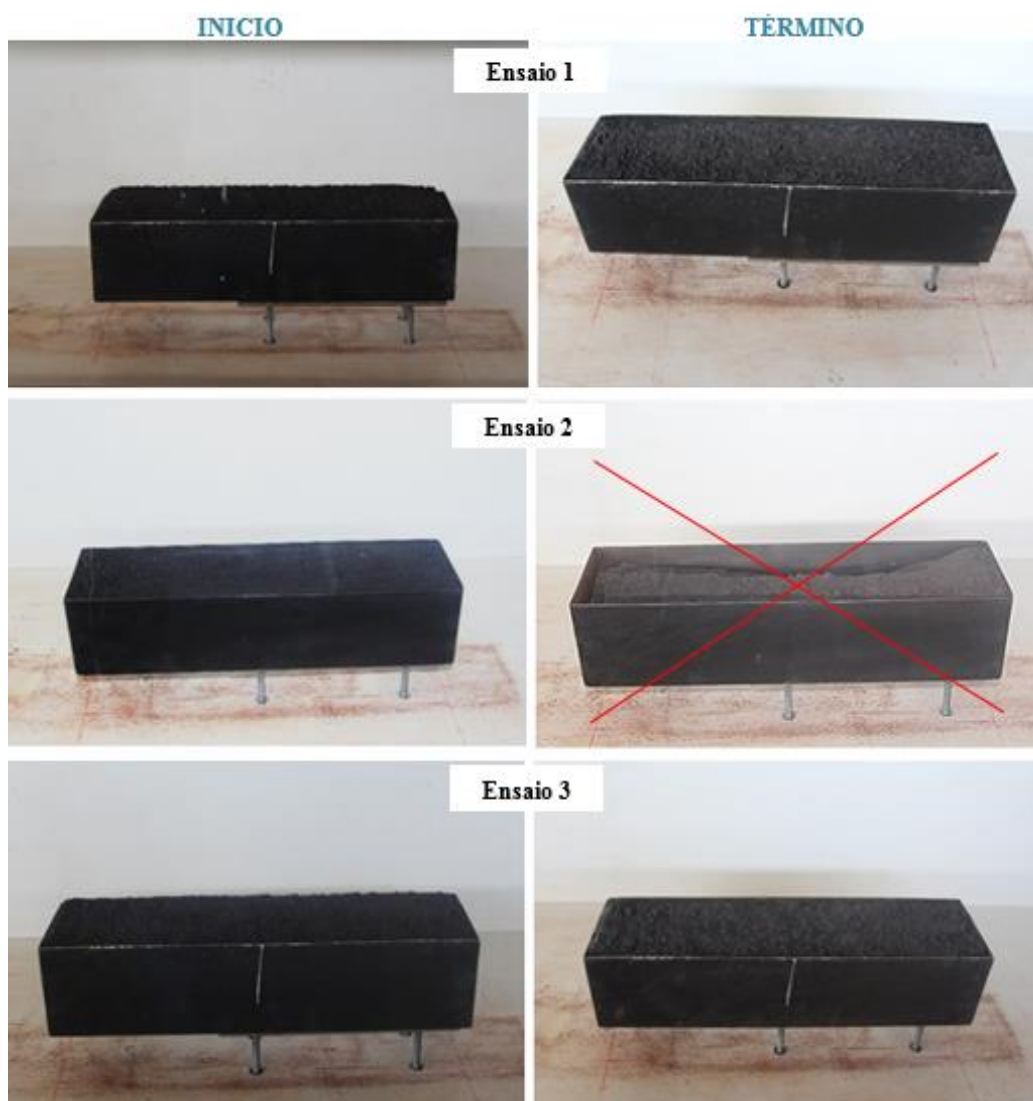
**Tabela – Perda de massa total, temperatura e umidade relativa do ar: Supressor BMA.**

| Ensaio | 1     |        |        | 2     |        |        | 3     |        |        | Média |        |
|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
|        | P (%) | UR (%) | T (°C) | P (%) | UR (%) | T (°C) | P (%) | UR (%) | T (°C) | P (%) | UR (%) |
| 0      | 0,00  | 65,0   | 31,7   | 0,00  | 66,2   | 31,7   | 0,00  | 70,2   | 30,1   | 0,00  | 67,13  |
| 1      | 0,90  | 64,2   | 32,0   | 0,85  | 64,4   | 32,3   | 0,81  | 63,2   | 32,5   | 0,85  | 63,93  |
| 2      | 1,46  | 59,1   | 33,7   | 1,41  | 58,6   | 33,4   | 1,36  | 56,8   | 33,9   | 1,41  | 58,17  |
| 3      | 1,94  | 49,9   | 36,3   | 1,91  | 52,2   | 35,6   | 1,76  | 57,3   | 33,3   | 1,87  | 53,13  |
| 4      | 2,22  | 52,8   | 34,8   | 2,19  | 57,3   | 34,5   | 2,10  | 57,6   | 33,6   | 2,17  | 55,90  |
| 5      | 2,29  | 75,0   | 27,6   | 2,40  | 59,8   | 33,1   | 2,31  | 58,7   | 33,3   | 2,33  | 64,50  |
| 6      | 2,36  | 90,3   | 27,6   | 2,61  | 61,0   | 32,6   | 2,51  | 65,6   | 31,8   | 2,49  | 72,30  |

**Figura – Aspecto do leito de minério de ferro no início e término dos ensaios: Supressor BMA.**

**Tabela – Perda de massa total, temperatura e umidade relativa do ar: Supressor IXOM.**

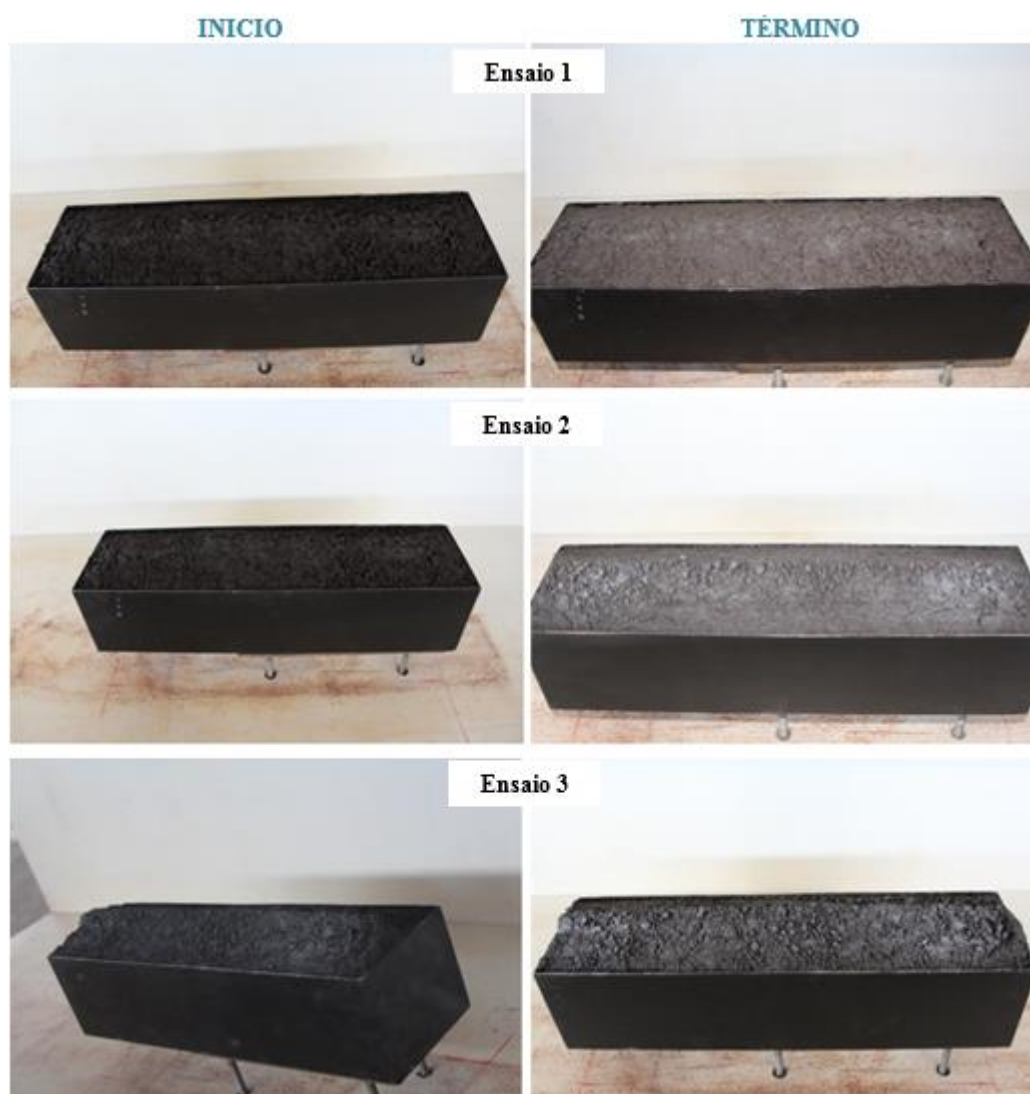
| Ensaio | 1        |           |           | 2                 |           |           | 3        |           |           | Média    |           |
|--------|----------|-----------|-----------|-------------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|
|        | P<br>(%) | UR<br>(%) | T<br>(°C) | P<br>(%)          | UR<br>(%) | T<br>(°C) | P<br>(%) | UR<br>(%) | T<br>(°C) | P<br>(%) | UR<br>(%) |
| 0      | 0,00     | 69,0      | 29,7      | <b>Descartado</b> |           |           | 0,00     | 69,7      | 30,7      | 0,00     | 69,35     |
| 1      | 0,90     | 73,8      | 29,1      |                   |           |           | 0,96     | 65,9      | 31,8      | 0,93     | 69,85     |
| 2      | 1,52     | 71,3      | 30,0      |                   |           |           | 1,51     | 67,0      | 32,2      | 1,52     | 69,15     |
| 3      | 1,94     | 69,0      | 30,3      |                   |           |           | 1,92     | 73,4      | 29,7      | 1,93     | 71,20     |
| 4      | 2,08     | 68,5      | 30,3      |                   |           |           | 2,13     | 63,4      | 31,9      | 2,10     | 65,95     |
| 5      | 2,49     | 60,7      | 31,8      |                   |           |           | 2,40     | 64,6      | 32,2      | 2,45     | 62,65     |
| 6      | 2,63     | 60,6      | 30,9      |                   |           |           | 2,61     | 73,6      | 30,9      | 2,62     | 67,10     |



**Figura – Aspecto do leito de minério de ferro no início e término dos ensaios com IXOM.**

**Tabela – Perda de massa total, temperatura e umidade relativa do ar: Supressor *Eco Crust White*.**

| Ensaio | 1        |           |           | 2        |           |           | 3        |           |           | Média    |           |
|--------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|
|        | P<br>(%) | UR<br>(%) | T<br>(°C) | P<br>(%) | UR<br>(%) | T<br>(°C) | P<br>(%) | UR<br>(%) | T<br>(°C) | P<br>(%) | UR<br>(%) |
| 0      | 0,00     | 65,1      | 31,1      | 0,00     | 60,5      | 32,2      | 0,00     | 75,4      | 29,3      | 0,00     | 67,00     |
| 1      | 1,11     | 56,7      | 33,2      | 1,12     | 33,8      | 33,4      | 0,78     | 69,8      | 30,4      | 1,00     | 53,43     |
| 2      | 1,67     | 50,1      | 35,4      | 1,75     | 50,0      | 35,9      | 1,41     | 71,4      | 30,3      | 1,61     | 57,17     |
| 3      | 2,09     | 49,1      | 34,8      | 2,09     | 49,1      | 35,2      | 1,90     | 59,8      | 32,7      | 2,03     | 52,67     |
| 4      | 2,44     | 47,7      | 35,4      | 2,44     | 50,0      | 35,5      | 2,18     | 58,3      | 33,3      | 2,36     | 52,00     |
| 5      | 2,65     | 52,0      | 33,4      | 2,72     | 50,2      | 35,3      | 2,54     | 57,0      | 33,2      | 2,64     | 53,07     |
| 6      | 2,79     | 65,5      | 30,9      | 2,86     | 51,4      | 34,7      | 2,75     | 63,1      | 32,1      | 2,80     | 60,00     |



**Figura – Aspecto do leito de minério de ferro no início e término dos ensaios: Supressor *Eco Crust White*.**

## APÊNDICE F – Memorial de cálculo de carga elétrica.

As equações abaixo são utilizadas para o cálculo da dosagem da carga elétrica da solução por massa de minério (pellet feed moído e pelota).

- Umidade do material –  $U$ :

$$U = \frac{M_{\text{água}}}{M_{\text{minério úmido}}} = \frac{M_{\text{água}}}{M_{\text{água}} + M_{\text{minério seco}}} [g/g]$$

Para o *pellet feed*, a massa de água é substituída pela massa de solução de supressor.

$$U = \frac{M_{\text{solução}}}{M_{\text{minério úmido}}} [g/g]$$

- Concentração da solução –  $C$ :

$$C = \frac{M_{\text{soluta}}}{M_{\text{solução}}} [g/g]$$

- Dosagem –  $D$ :

$$D = \frac{M_{\text{soluta}}}{M_{\text{minério seco}}} [g/kg]$$

$$D = \frac{M_{\text{soluta}}(g) * P.M. \left(\frac{g}{mol}\right)^{-1} * e \left(\frac{C}{elétron}\right) * N_A \left(\frac{elétron}{mol}\right) * Valência * Cátion}{M_{\text{minério seco}} (kg)} [C/kg]$$

Sendo:

$M$  – Massa;

$P.M.$  – Peso molecular;

$e$  – Carga elétrica elementar ( $1,6 * 10^{-19}$ );

$N_A$  – Número de Avogrado ( $6,02 * 10^{+23}$ );



## APÊNDICE G – Reagentes Eletrólitos em Solução Aquosa.

As tabelas a seguir apresentam as condições de ensaios com os reagentes eletrólitos, em pellet feed moído (PFM) e em pelotas.

**Tabela – Condições dos testes de supressão da geração de poeira em PFM com eletrólitos.**

| Coagulante                 | Hidróxido de cálcio | Cloreto férrico   | Cloreto de cálcio | Sulfato de alumínio                             | Sulfato férrico                                 |
|----------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|---|---|
| Fórmula                    | Ca(OH) <sub>2</sub> | FeCl <sub>3</sub> | CaCl <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> |
| Peso molecular (g)         | 74,09               | 162,20            | 110,98            | 342,15  | 399,88  |
| Valência                   | 2                   | 3                 | 2                 | 3   | 3   |
| Balanço cátion             | 1                   | 1                 | 1                 | 2   | 2   |
| Umidade do minério PFM     | 6%                  | 6%                | 6%                | 6%  | 6%  |
| Massa de minério úmida (g) | 1000                | 1000              | 1000              | 1000  | 1000  |
| Massa de solução (g)       | 60                  | 60                | 60                | 60  | 60  |
| Massa de minério seco (g)  | 940                 | 940               | 940               | 940   | 940   |
| <b>Solução</b>             | <b>4%</b>           | <b>4%</b>         | <b>4%</b>         | <b>4%</b>                                       | <b>4%</b>                                       |
| Massa de soluto (g)        | 2,4                 | 2,4               | 2,4               | 2,4   | 2,4   |
| Dosagem (g/kg)             | 2,55                | 2,55              | 2,55              | 2,55  | 2,55  |
| Dosagem (mol/kg)           | 3,45E-02            | 1,57E-02          | 2,30E-02          | 7,46E-03  | 6,38E-03  |
| <b>Dosagem (C/kg)</b>      | <b>6638,26</b>      | <b>4548,39</b>    | <b>4431,69</b>    | <b>4312,51</b>                                  | <b>3689,95</b>                                  |
| Nº de Partículas - 5 µm    | 1691                | 873               | 1343              | 706   | 269   |
| Nº de Partículas - 10 µm   | 1321                | 628               | 889               | 442   | 241   |
| <b>Solução</b>             | <b>10%</b>          | <b>10%</b>        | <b>10%</b>        | <b>10%</b>                                      | <b>10%</b>                                      |
| Massa de soluto (g)        | 6                   | 6                 | 6                 | 6   | 6   |
| Dosagem (g/kg)             | 6,38                | 6,38              | 6,38              | 6,38  | 6,38  |
| Dosagem (mol/kg)           | 8,61E-02            | 3,94E-02          | 5,75E-02          | 1,87E-02  | 1,60E-02  |
| <b>Dosagem (C/kg)</b>      | <b>16595,66</b>     | <b>11370,97</b>   | <b>11079,23</b>   | <b>10781,26</b>                                 | <b>9224,86</b>                                  |
| Nº de Partículas - 5 µm    | 2515                | 685               | 503               | 855   | 121   |
| Nº de Partículas - 10 µm   | 1934                | 450               | 328               | 601   | 105   |

**Tabela – Condições dos testes de supressão da geração de poeira em pelotas com eletrólitos.**

| Coagulante                        | Hidróxido de cálcio | Cloreto férrico   | Cloreto de cálcio | Sulfato de alumínio                             | Sulfato férrico                                 |
|-----------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|---|---|
| Fórmula                           | Ca(OH) <sub>2</sub> | FeCl <sub>3</sub> | CaCl <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> |
| Peso molecular (g)                | 74,09               | 162,20            | 110,98            | 342,15  | 399,88  |
| Valência                          | 2                   | 3                 | 2                 | 3   | 3   |
| Balanço cátion                    | 1                   | 1                 | 1                 | 2   | 2   |
| Massa de pelota (g)               | 1000                | 1000              | 1000              | 1000  | 1000  |
| <b>Concentração da solução</b>    | <b>4%</b>           | <b>4%</b>         | <b>4%</b>         | <b>4%</b>                                       | <b>4%</b>                                       |
| Número de partículas - sem cura   |                     |                   |                   |   |   |
| Volume de solução (ml)            | 10                  | 10                | 10                | 10  | 10  |
| Massa de soluto (g)               | 0,4                 | 0,4               | 0,4               | 0,4   | 0,4   |
| Dosagem (g/kg)                    | 0,40                | 0,40              | 0,40              | 0,40  | 0,40  |
| Dosagem (mol/kg)                  | 5,40E-03            | 2,47E-03          | 3,60E-03          | 1,17E-03  | 1,00E-03  |
| Dosagem (C/kg)                    | 1039,99             | 712,58            | 694,30            | 675,63  | 578,09  |
| 5 µm                              | 189                 | 2009              | 5374              | 15673   | 3129  |
| 10 µm                             | 37                  | 504               | 953               | 2507  | 614   |
| Número de partículas - 2h de cura |                     |                   |                   |   |   |
| 5 µm                              | 8241                | 1655              | 683               | 5474  | 1411  |
| 10 µm                             | 1431                | 613               | 140               | 975   | 378   |
| Número de partículas - sem cura   |                     |                   |                   |   |   |
| Volume de solução (ml)            | 16                  | 16                | 16                | 16  | 16  |
| Massa de soluto (g)               | 0,64                | 0,64              | 0,64              | 0,64  | 0,64  |
| Dosagem (g/kg)                    | 0,64                | 0,64              | 0,64              | 0,64  | 0,64  |
| Dosagem (mol/kg)                  | 8,64E-03            | 3,95E-03          | 5,77E-03          | 1,87E-03  | 1,60E-03  |
| Dosagem (C/kg)                    | 1663,99             | 1140,13           | 1110,88           | 1081,00   | 924,95  |
| Número de partículas - sem cura   |                     |                   |                   |   |   |
| 5 µm                              | 279                 | 1310              | 1615              | 3592  | 2403  |
| 10 µm                             | 67                  | 345               | 319               | 553   | 457   |
| Número de partículas - 2h de cura |                     |                   |                   |   |   |
| 5 µm                              | 1761                | 7751              | 750               | 6586  | 1215  |
| 10 µm                             | 501                 | 3985              | 151               | 1393  | 349   |



**Tabela – Condições dos testes de supressão da geração de poeira em pelotas com adição de 1% de finos, com eletrólitos.**

| Coagulante                        | Hidróxido de cálcio | Cloreto férrico   | Cloreto de cálcio | Sulfato de alumínio                             | Sulfato férrico                                 |
|-----------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|---|---|
| Fórmula                           | Ca(OH) <sub>2</sub> | FeCl <sub>3</sub> | CaCl <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> |
| Peso molecular (g)                | 74,09               | 162,20            | 110,98            | 342,15  | 399,88  |
| Valência                          | 2                   | 3                 | 2                 | 3   | 3   |
| Balanço cátion                    | 1                   | 1                 | 1                 | 2   | 2   |
| Massa de pelota (g)               | 1000                | 1000              | 1000              | 1000  | 1000  |
| <b>Concentração da solução</b>    | <b>4%</b>           | <b>4%</b>         | <b>4%</b>         | <b>4%</b>                                       | <b>4%</b>                                       |
| Número de partículas - sem cura   |                     |                   |                   |   |   |
| Volume de solução (ml)            | 10                  | 10                | 10                | 10  | 10  |
| Massa de soluto (g)               | 0,4                 | 0,4               | 0,4               | 0,4   | 0,4   |
| Dosagem (g/kg)                    | 0,40                | 0,40              | 0,40              | 0,40  | 0,40  |
| Dosagem (mol/kg)                  | 5,40E-03            | 2,47E-03          | 3,60E-03          | 1,17E-03  | 1,00E-03  |
| Dosagem (C/kg)                    | 1039,99             | 712,58            | 694,30            | 675,63  | 578,09  |
| 5 µm                              | 962                 | 4033              | 2815              | 10626   | 4495  |
| 10 µm                             | 248                 | 1263              | 475               | 1556  | 975   |
| Número de partículas - 2h de cura |                     |                   |                   |   |   |
| 5 µm                              | 12551               | 8773              | 2946              | 2098  | 10511   |
| 10 µm                             | 3670                | 4297              | 516               | 316   | 1685  |
| Número de partículas - sem cura   |                     |                   |                   |   |   |
| Volume de solução (ml)            | 16                  | 16                | 16                | 16  | 16  |
| Massa de soluto (g)               | 0,64                | 0,64              | 0,64              | 0,64  | 0,64  |
| Dosagem (g/kg)                    | 0,64                | 0,64              | 0,64              | 0,64  | 0,64  |
| Dosagem (mol/kg)                  | 8,64E-03            | 3,95E-03          | 5,77E-03          | 1,87E-03  | 1,60E-03  |
| Dosagem (C/kg)                    | 1663,99             | 1140,13           | 1110,88           | 1081,00   | 924,95  |
| Número de partículas - sem cura   |                     |                   |                   |   |   |
| 5 µm                              | 1798                | 2568              | 1540              | 7531  | 2242  |
| 10 µm                             | 449                 | 697               | 327               | 1035  | 490   |
| Número de partículas - 2h de cura |                     |                   |                   |   |   |
| 5 µm                              | 7028                | 3716              | 755               | 4474  | 10609   |
| 10 µm                             | 2465                | 1422              | 192               | 737   | 2570  |