



ESTUDO EM TÚNEL DE VENTO DA SECAGEM DE PILHA DE ARMAZENAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

MACIEL C. FURTADO^{1*}, ARTHUR R. L. FONTANA¹, DANIEL S. SILVA¹, JOSÉ A. S. RIBEIRO JUNIOR¹, ANDRÉ L. AMARANTE MESQUITA¹, RONALDO M. SANTOS JÚNIOR²

¹Universidade Federal do Pará, Campus de Tucuruí, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NDAE), Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados (FluidPar)

²Vale S.A., Meio Ambiente

*e-mail: macielcosta@ufpa.br

RESUMO - O manuseio e o transporte de minérios geram impacto ao ambiente, devido a geração de poluição atmosférica, entre outros, provocada por material particulado gerado. Essa emissão é mais acentuada quando os materiais se encontram com baixa umidade. Dentre as diversas ações implementadas pelas mineradoras para o controle das emissões de fino de material particulado, destaca-se o procedimento de aspersão de água. Para que o processo de abatimento de poeira por meio do método de aspersão seja otimizado é essencial que o processo de secagem desses tipos de materiais seja conhecido em detalhes. Diante disso, este artigo apresenta um estudo sobre o processo de secagem em pilhas de minério de ferro. Para isso, testes em túnel vento foram realizados para um modelo de pilha de minério de ferro na escala 1:200. A metodologia estabelecida permitiu avaliar o processo de secagem, a partir da distribuição de umidade no interior do modelo de pilha ao longo do tempo. Os resultados do estudo fornecem informações que podem subsidiar a validação de modelos numérico, assim como subsidiar para sistema de aspersão mais eficientes.

INTRODUÇÃO

A estocagem a céu aberto de materiais particulados finos, tais como as que ocorrem em pilhas de fino de minério de ferro, causam poluições por poeira e isso se torna um problema ambiental (Cheng *et al.*, 2020). Essa poluição afeta principalmente as cidades e comunidades do entorno, onde esses materiais são armazenados e manuseados (Santos Junior *et al.*, 2018). A inalação desse tipo poeira pode causar doenças respiratórias graves, tais como, a pneumoconiose iniciada pelo acúmulo de partícula na região alveolar dos pulmões (Zhang *et al.*, 2018). A emissão de poeiras em pilhas se dá pelo cisalhamento do ar com a superfície do material e essa emissão é mais acentuada quando tais materiais se encontram pouco úmidos, dado que a reduzida umidade torna as partículas mais leves e susceptíveis a dispersão (Liu *et al.*, 2020).

Dentre as diversas ações implementadas pelas mineradoras para o controle das emissões de fino de material particulado, destaca-se o procedimento de aspersão de água (Lee *et al.*, 2021). A adição de água na superfície do material aumenta a sua umidade, reduzindo as chances de que o particulado fino seja arrastado pela ação do vento e entre em suspensão (Liu *et al.*, 2021). Para aumentar a eficiência de supressão de poeira por aspersão de água, o conhecimento do processo de secagem dessa classe de material precisa ser estudado em detalhes. A caracterização do processo de secagem para o minério de ferro tem sido estudada por diferentes pesquisadores utilizando diferentes ferramentas de análise. Os estudos de Pinto *et al.*, (2020), Santos Junior *et al.* (2018) e Borba (2017) são exemplos de investigação do processo de secagem para fins de minério de ferro usando teste em túneis de vento. Athayde *et al.* (2018) apresentaram um estudo sobre a cinética de secagem de uma

pelota verde de minério de ferro utilizando energia transmitida por micro-ondas de modo a avaliar a qualidade final da pelota. Namkung e Cho (2004) em seu trabalho determinaram as características de secagem de partículas de minério de ferro com uso de um secador de transporte pneumático vertical. Ljung *et al.*, (2012) estudaram a secagem de um leito poroso de pelotas de minério de ferro usando uma abordagem bidimensional discreta, onde os resultados do modelo mostram que em baixa velocidade de fluxo a temperatura dos *pellets* aumenta com uma taxa relativamente lenta.

Este artigo apresenta um estudo do processo de secagem para um modelo de pilha de minério de ferro em escala de laboratório. O processo de secagem é investigado por teste em túneis de vento e através da estratificação e coleta de amostras em camadas da pilha para secagem em estufa por 24 horas para verificação da umidade final após o término do ensaio em túnel de vento. O objetivo do estudo é o de melhorar a compreensão do processo de secagem que ocorre nessa classe de material através da metodologia de estudo estabelecida. Além disso, este trabalho servirá de base para desenvolvimento de modelos numéricos que possam estar simulando o processo de secagem em pilha para investigações mais detalhadas dos fenômenos envolvidos, assim como, as percepções desta investigação podem ser aplicadas para otimizar os métodos de supressão de poeira a fim de garantir economia no consumo de água e energia.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Para esse estudo foi utilizado um túnel de vento de seção de teste aberta (0,60 m x 0,60) com comprimento de 1,80 m e velocidade máxima de 30 m/s. O material utilizado para este estudo foi o minério de ferro tipo *sinter feed* com granulometria média na faixa de 850 μm a 9520 μm determinados com base na norma NBR 7181 (ABNT, 2016). Para a formação da pilha usou-se um molde impresso em uma impressora 3D. A escala do modelo da pilha foi 1:200 do tamanho real encontrados nos pátios de estocagem no porto de Tubarão em Vitória no Estado do Espírito Santo. A Figura 1

mostra o molde usado para a formação da pilha e a Figura 2 mostra a pilha formada.



Figura 1: Vista superior do molde do modelo de pilha



Figura 2: Pilha de minério de ferro (*sinter feed*) na escala 1:200.

Para a estratificação e coleta do material da pilha ao final do teste em túnel de vento, uma grade foi utilizada. O uso da grade é necessário para garantir o mínimo de interferência na coleta de material em regiões distintas da pilha. A Figura 3 mostra a imagem da grade utilizada para estratificação do modelo da pilha ao final do teste em túnel de vento.



Figura 3: Grade de estratificação do modelo da pilha

Um contador de partícula da marca *Particles Plus* modelo 8506 foi utilizado na saída da seção de teste do túnel de vento. O objetivo da medição é avaliar a concentração de

material particulado durante os testes em túnel de vento para verificação da perda de massa de material da pilha durante os testes. Além da medição de concentração de partícula, o contador reporta também dados de temperatura e a umidade relativa do ar no momento dos ensaios. Figura 4 mostra os detalhes do contador de partícula usado no estudo.



Figura 4: Contador de partícula *Particles Plus* 8306

A velocidade de escoamento do ar sobre a pilha foi de 1,5 m/s, de modo a ter o mínimo de perda de massa de minério possível e observar tão somente a secagem do material. Uma estufa de secagem é usada para avaliação do teor de umidade final da pilha ao final dos testes.

Método

A preparação da amostra úmida da pilha a ser ensaiada é baseada na metodologia do trabalho de Santos Junior *et al.*, (2018). Para esse trabalho foi considerado uma umidade teórica inicial de referência de 8%. Após a etapa de preparação da amostra, o modelo da pilha é levado à seção de teste do túnel de vento. A Figura 5 mostra a disposição do modelo da pilha de minério na seção de teste do túnel de vento.



Figura 5: Disposição do modelo da pilha na seção de teste do túnel de vento.

O mecanismo de secagem é avaliado usando a metodologia de estratificação e coleta de material em camadas. Nessa metodologia, todo o material da pilha ao final do teste em túnel de vento é dividido em 4 seções ao longo do seu eixo longitudinal e 5 seções ao longo do eixo transversal. Essa divisão é feita usando a grade de estratificação mostrada na Figura 3. Cada região estratificada da pilha é identificada com um número, conforme mostra a Figura 6. Para as regiões da pilha com identificação dada por 1, 5, 6, 10, 11, 15, 16 e 20, a coleta de material foi feita em duas camadas ao longo de sua altura, por serem as regiões de borda da pilha e com menos material. Para as demais regiões da pilha a coleta foi feita em 3 camadas. A coleta da primeira camada corresponde a região próxima à superfície do leito (total de 20 amostras), a segunda camada corresponde ao interior médio do leito (total de 20 amostras) e a terceira camada corresponde a parte mais profunda da pilha (12 amostras). Portanto, foram coletadas 52 amostras de material da pilha ao final de cada ensaio.

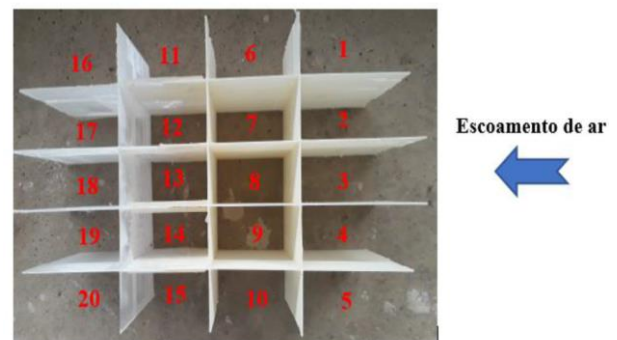


Figura 6: Identificação das regiões de coleta

O estudo da secagem de pilha em túnel de vento teve duração de 6 horas, dividido em 6 ensaios. O primeiro ensaio teve duração de 1 hora e os ensaios subsequentes tiveram suas durações aumentada em 1 hora até fechar o total de 6 horas e 6 ensaios. Ao final de cada ensaio as amostras coletadas são levadas para estufa para a secagem a 100 °C por 24 horas. Para cada ensaio foi considerado outro modelo de pilha e para minimizar os erros aleatórios de medição cada ensaio foi realizado em triplicata. A Figura 7 mostra o fluxograma dos testes experimentais.

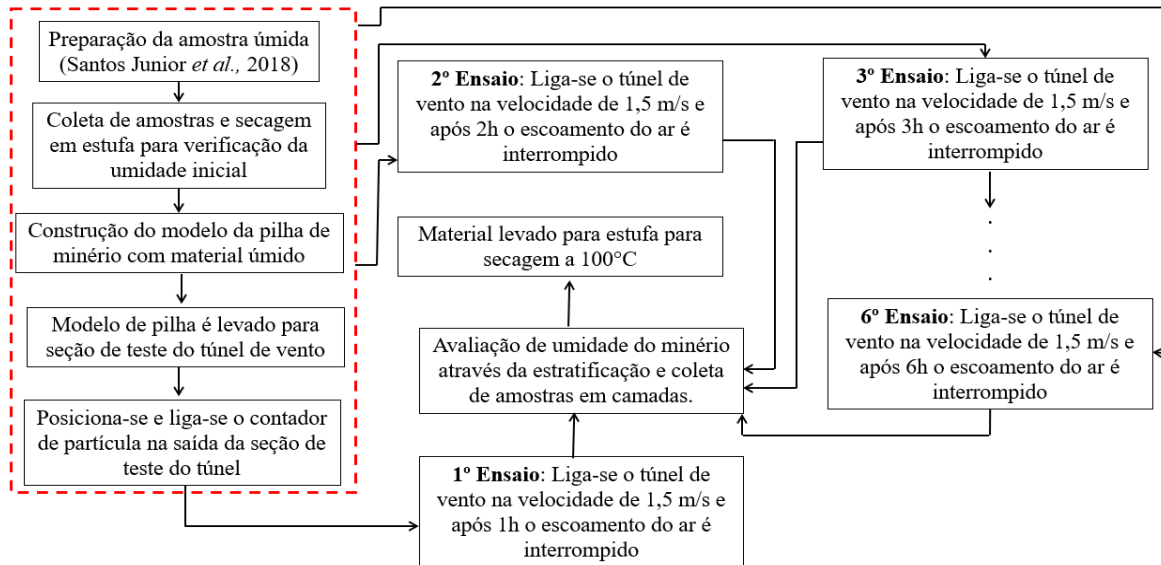


Figura 7: Fluxograma das etapas do processo experimental

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 8 mostra a cinética global de secagem para as 3 camadas de minério avaliadas ao longo da altura da pilha. Apesar do resultado mostrar os teores de umidade bem próximo um dos outros, para as três camadas o resultado mostra que o decaimento de umidade é maior na camada 1 que é a camada próxima à superfície exposta da pilha. A umidade relativa do ar e temperatura do ambiente apresentaram pouca variação ao longo de todos os teste experimentais, com valores na faixa de 65% e 25 °C, respectivamente.

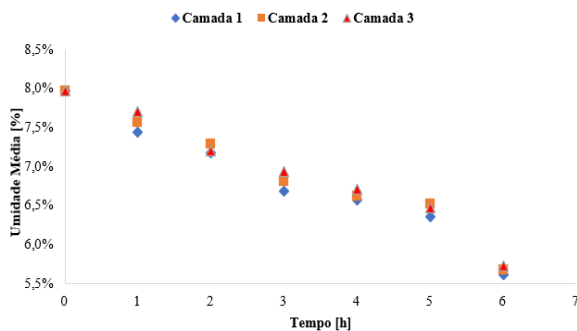


Figura 8: Cinética de secagem para umidade média global das camadas

O resultado da avaliação da cinética de secagem da camada 1 para diferentes regiões da pilha é mostrada na Figura 9. A região frontal da pilha corresponde a região compreendida pelo número de 1 a 5 (ver Figura 6), a região central da pilha corresponde a região dada pelos números de 6 a 15 e a região do bordo de fuga pela pilha pelos números de 16 a 20. Os resultados dos

testes para a avaliação da umidade para camada superficial da pilha mostram que até 2 horas a região frontal da pilha apresentou teores de umidade ligeiramente superiores as da região central e bordo de fuga. Uma explicação provável para isso pode está relacionado ao fato de a taxa de evaporação ser menor que taxa de migração de água para as camadas superiores nessa região. Após 2 horas a região frontal passa a apresentar um decaimento de umidade maior comparado as demais regiões, resultado esse já esperado, em virtude dos efeitos de transferência de calor e massa decorrente do desenvolvimento da camada limite do escoamento sobre a pilha.

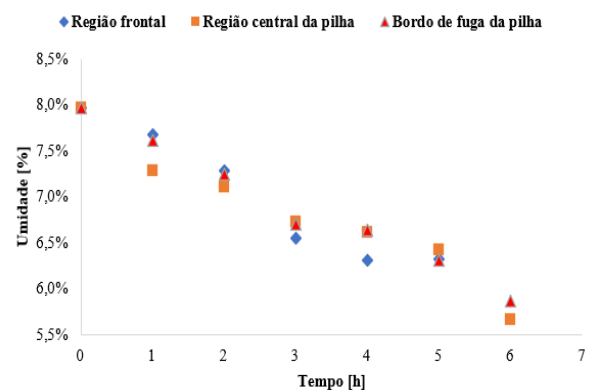


Figura 9: Cinética de secagem para umidade média da camada 1 para as regiões frontal, central e bordo de fuga da pilha

A Figura 10 mostra a taxa de secagem em função do tempo para a região frontal, do meio e do bordo de fuga da pilha para camada 1. Para todas as regiões analisadas próximo à superfície, o comportamento da taxa de

secagem não apresenta uma tendência clara até o tempo de 3 horas de teste. Incertezas associadas a compactação de material e distribuição não uniformes da porosidade do leito podem tornar-se um empecilho para que a taxa de migração de umidade e consequentemente para taxa de secagem na superfície. Após esse período, a taxa de secagem começa a crescer e ao final de 6 horas de avaliação o resultado mostra que taxa de secagem é maior na região frontal, seguido da região do meio e do bordo de fuga.

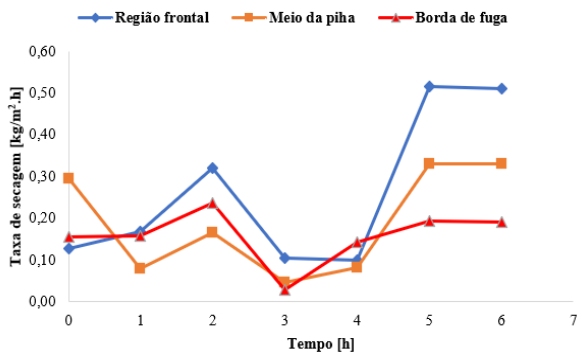


Figura 10: Taxa de secagem da camada 1 para as regiões frontal, do meio e borde de fuga da pilha

As Figuras 11, 12 e 13 mostram o gradiente de umidade no interior do modelo de pilha ao longo do eixo longitudinal para as regiões 3, 8, 13 e 18 para os tempos de 1, 3 e 6 horas. Os resultados mostram haver uma diminuição gradual e significativa no valor da umidade conforme a camada se aproxima da superfície do material exposto ao escoamento. Esta observação é explicada devido ao fato que ocorre a secagem da camada superior da pilha, regiões estas, mais propensas a emissão de partículas conforme a secagem avança.

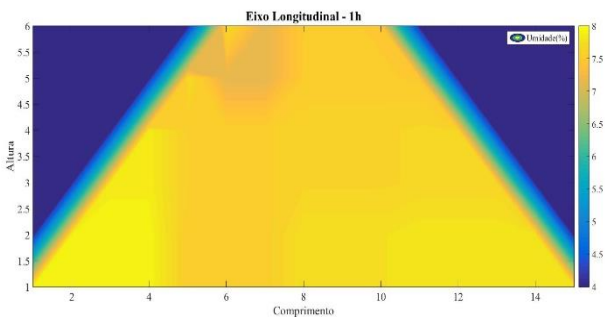


Figura 11: Gradiente de umidade da pilha para as regiões 3, 8, 13 e 18 ao longo do eixo longitudinal para 1h de ensaio.

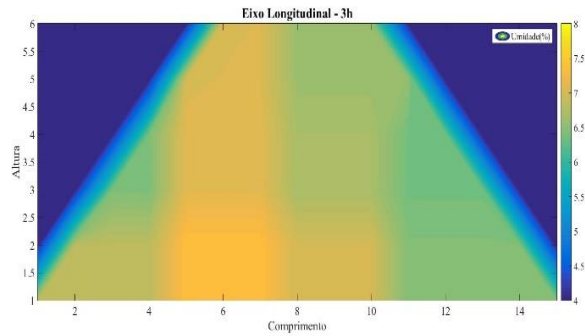


Figura 12: Gradiente de umidade da pilha para as regiões 3, 8, 13 e 18 ao longo do eixo longitudinal para 3h de ensaio.

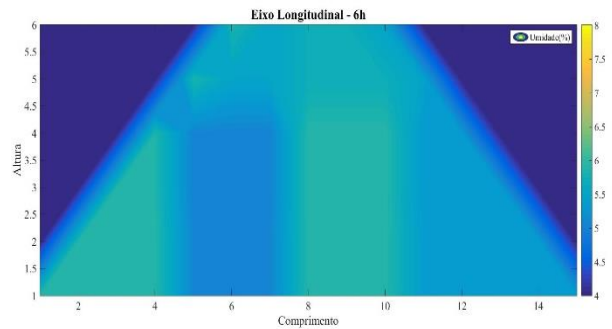


Figura 13: Gradiente de umidade da pilha para as regiões 3, 8, 13 e 18 ao longo do eixo longitudinal para 6h de ensaio.

As Figuras 14, 15 e 16 mostram os gradientes de umidade para região frontal do modelo de pilha para os tempos de 1, 3 e 6 horas. A região frontal da pilha é a região com maior taxa de secagem e isso pode ser observado nos resultados das imagens das figuras. Para todos os resultados, a umidade das camadas inferiores deve migrar por capilaridade para superfície para ser evaporada. Tais resultado fornecem informações importantes para o estudo e desenvolvimento de modelos numérico que ajudam a compreender o fenômeno.

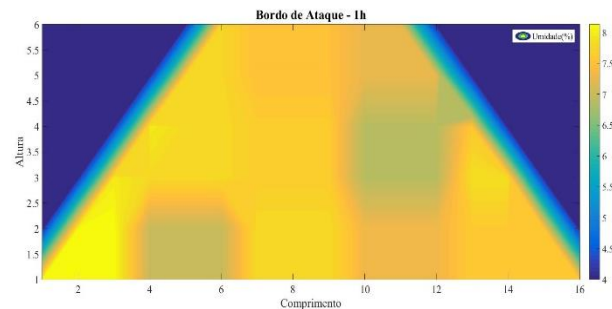


Figura 14: Gradiente de umidade avaliado na parte frontal da pilha para as regiões 1, 2, 3, 4 e 5 para 1h de ensaio

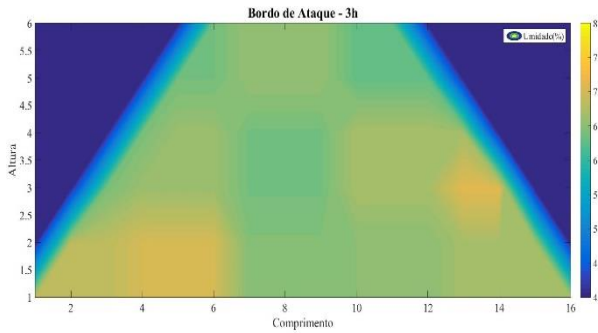


Figura 15: Gradiente de umidade avaliado na parte frontal da pilha para as regiões 1, 2, 3, 4 e 5 para 3h de ensaio

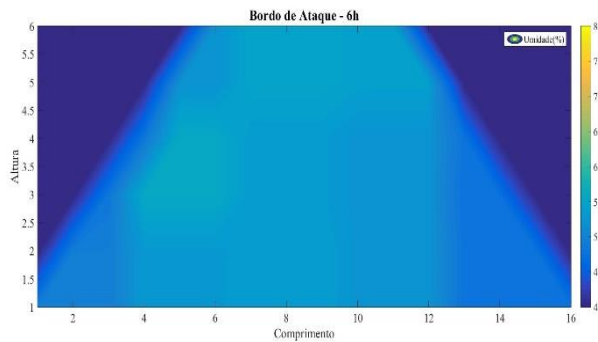


Figura 16: Gradiente de umidade avaliado na parte frontal da pilha para as regiões 1, 2, 3, 4 e 5 para 6h de ensaio

As Figuras 17, 18 e 19 mostram os gradientes de umidade para região do bordo de fuga do modelo de pilha para os tempos de 1, 3 e 6 horas. A comparação dos gradientes de umidades do bordo de fuga com a parte frontal pode ser feita e é possível notar que a região do bordo de fuga da pilha permanece mais úmido em comparação com a parte frontal da pilha.

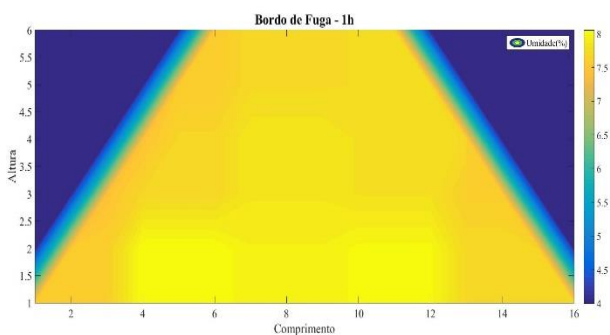


Figura 17: Gradiente de umidade avaliado no bordo de fuga da pilha para as regiões 16, 17, 18, 19 e 20 para um 1h de ensaio

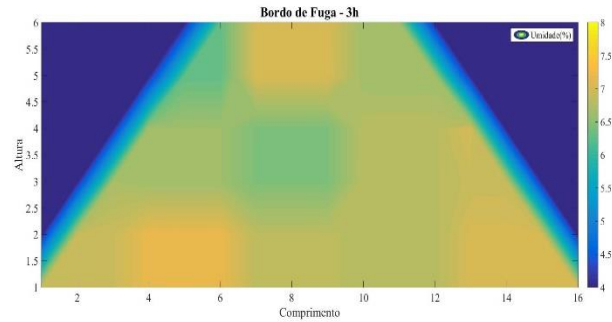


Figura 18: Gradiente de umidade avaliado no bordo de fuga da pilha para as regiões 16, 17, 18, 19 e 20 para um 3h de ensaio

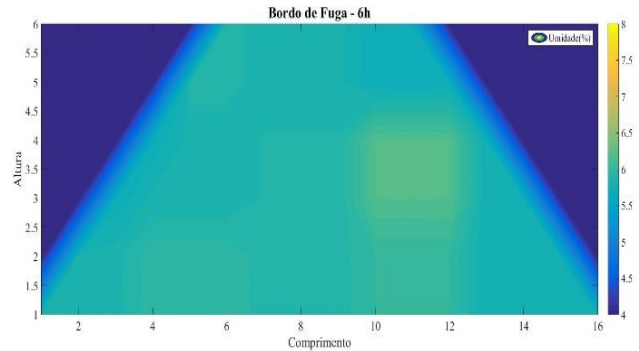


Figura 19: Gradiente de umidade avaliado no bordo de fuga da pilha para as regiões 16, 17, 18, 19 e 20 para um 6h de ensaio

A avaliação da emissão de partícula na saída do túnel de vento para os tempos de secagem de 1, 3 e 6 horas são mostrados nas Figuras 20, 21 e 22. Os gráficos das figuras mostram a concentração de partícula na saída do túnel de vento em micrograma por centímetro cúbico em função do tempo. Observa-se que os ensaios 1 e 2 para os testes com duração de 1 hora tiveram maiores níveis de emissão de partícula, em especial o ensaio 1 e tal comportamento pode ter influenciado nos resultados mostrado na Figura 9, onde a região frontal da pilha apresentou maior umidade nas primeiras horas de secagem, uma vez, que essa emissão expõe regiões abaixo dela com umidade maior e isso pode ter contribuído para sua umidade ter dado maior que as demais regiões observadas. Para o ensaio 3 com duração de 1 hora, a emissão de partícula foi bem controlada com a mínima emissão. Para os resultados mostrados nas Figuras 21 e 22, apesar do pico de emissão observado nos testes de 3 e 6 horas de duração, mas a concentração de material partícula ainda, sim, é muito pequena. Apesar da pouca emissão observada ao longo de todo o processo, uma investigação

mais detalhada é necessária de modo a saber até onde emissão desses tipos podem impactar no estudo da secagem em pilhas.

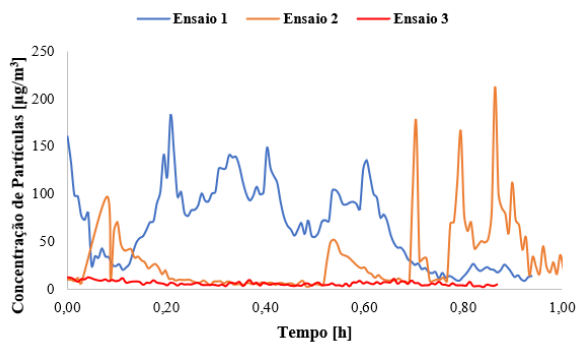


Figura 20: Dados da concentração de partícula na saída da seção de teste do túnel de vento para 1h de teste.

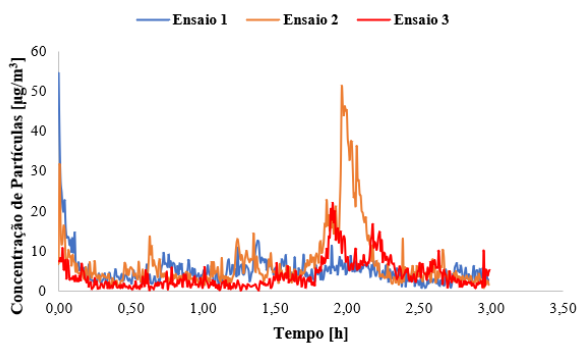


Figura 21: Dados da concentração de partícula na saída da seção de teste do túnel de vento para 3h de teste.

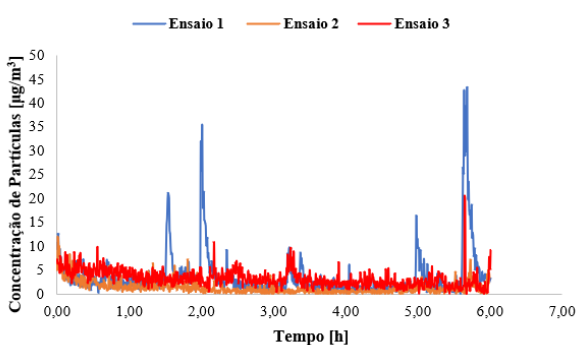


Figura 22: Dados da concentração de partícula na saída da seção de teste do túnel de vento para 3h de teste.

CONCLUSÃO

O estudo do processo de secagem que ocorrem em pilha de minério é importante para o entendimento e desenvolvimento de soluções que minimize os impactos gerados pela emissão de poeira. Este trabalho teve como objetivo o estabelecimento de uma metodologia de estudo

de secagem em pilhas de minério de ferro, de modo, a contribuir para o entendimento do processo. Através da metodologia estabelecida foi possível obter a distribuição de umidade na pilha. A informação do valor de umidade próxima à superfície da pilha pode ser usada em sistema inteligentes para aspergir de forma eficiente, e otimizar a pulverização a base de água ou surfactante sobre a pilha.

O estudo experimental da secagem de pilha de minério de ferro em túnel de vento contou o uso de um contador de partícula para avaliação da emissão de partícula durante o processo de secagem. Apesar do nível de emissão observado durante os testes, ter sido baixa, uma investigação mais detalhada do seu impacto sobre o processo de secagem em pilha precisar ser melhor avaliada. O banco de dados gerado será empregado para a validação de um modelo numérico em desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- ATHAYDE, M., FONSECA, M. C., COVCEVICH, B. M. (2018), Iron ore pellet drying assisted by microwave: A kinetic evaluation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. Vol. 39, p.266–275.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 7181, (2016), Norma Brasileira – Solo – Análise granulométrica. Segunda Edição.
- BORBA, M. V. S. (2017), Avaliação do uso de diferentes Tipos de polímeros de pó no controle de emissões atmosféricas durante o transporte de minério de ferro na EFVM - Estrada de Ferro Vitória A Minas. [s.l.] Instituto Tecnológico Vale.
- CHENG, J., WANG, Y., LEI, Y., ZHEG, X., LUO, W., SONG, W. (2020), Study on cal dust crusting for coal pile based on a compound binder. *Powder Technology*, Vol. 376, p.149-166.
- LIU, Z., FU, J., YANG, M., ZHAO, J., SONG, Y. (2020), New model for particle removal from surface in presence of deformed liquid bridge. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 562, p. 268–272.
- LJUNG, A. L., FRISHFELDS, V., LUNDSTROM, T. S., MARJAVAARA, B. D. (2012), Discrete and Continuous

- Modeling of Heat and Mass Transport in Drying of a Bed of Iron Ore Pellets. *Drying Technology*, Vol. 30, p.760-773.
- LEE, Y. Y., YUAN, C. S., YEN, P. H., MUTUKU, J. K., HUANG, C. E., WU, C. C., HUANG, P. J. (2021), Suppression Efficiency for Dust from an Iron Ore Pile Using a Conventional Sprinkler and a Water Mist Generator. *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 22, p.210320.
- NAMKUNG, W. & CHO, M. (2004), Pneumatic Drying of Iron Ore Particles in a Vertical Tube. *Drying Technology*, Vol. 22, p. 877-891.
- PINTO, T. C. S., JUNIOR, D. M., LIA, L. R. B., FILHO, L. S. L. (2015), Mecanismo de secagem visando a redução de umidade em Sinter Feed de minério de ferro. 45° Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 16° Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 3° Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, Rio de Janeiro.
- PINTO, T. C. S.; SOUZA, A. S.; BATISTA, J. N. M.; SARKIS, A. M.; FILHO, L. S. L.; PADUA, T. F., BÉTTEGA, R. (2021), Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed. *Drying Technology*, Vol. 39, p. 1359-1370.
- SANTOS JUNIOR, R. M. S., FONTANA, A. R. L., SILVA, A. J. C., MESQUITA, A. L. A., GONTIJO, C. F. (2018), Estudo do Arraste Eólico em Minério de Ferro tipo Pellet Feed Simulando o Transporte Ferroviário em Túnel de Vento. 19° de Mineração, parte integrante da ABM Week. São Paulo, Brasil.
- ZHANG, Q., ZHOU, G., QIAN, X., YUAN, M., SUN, Y., WANG, D. (2018), Diffuse pollution characteristics of respirable dust in fully mechanized mining face under various velocities based on CFD investigation. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 184, p.239-250.