



Análise Experimental da Secagem de Leito de Minério de Ferro com Escoamento Externo de Ar

Artur José Cunha da Silva¹; Arthur dos Reis Lemos Fontana¹; Hemerson da Conceição Wanzeler¹; Ryan Luiz Rodrigues Louzada¹; André Luiz Amarante Mesquita¹; Ronaldo Menezes dos Santos Júnior²

✉ arturjose@ufpa.br

1. *Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia / Universidade Federal do Pará, Brasil.*
2. *Complexo portuário de Tubarão – ES, Brasil.*

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: 02 de junho de 2022

Aceito em: 11 de abril de 2023

Publicado em: 31 de agosto de 2023

Resumo: A geração de poeira devido ao transporte e manuseio de minério de ferro é um problema ambiental em destaque atualmente. A redução dos níveis de emissão tem sido foco de muitas empresas do setor mineral, que implementam soluções como a utilização de produtos supressores e enclausuramento de pontos de transferência. A emissão de poeira é potencializada pelas condições atmosféricas locais, que provocam a evaporação da umidade superficial do minério úmido, quebrando as pontes de líquido que mantêm as partículas ligadas entre si. Além da perda de massa, o gradiente de umidade entre a superfície ressecada e as camadas inferiores inicia e mantém o transporte de umidade por capilaridade e difusão para evaporação na superfície. Visando definir a dinâmica de secagem de *sinter feed*, utilizou-se um túnel de secagem de seção aberta com sistema de pesagem e sensor de umidade para replicar três diferentes condições atmosféricas ($1,5m.s^{-1}$ e $23^{\circ}C$; $3,0m.s^{-1}$ e $26^{\circ}C$; $4,5m.s^{-1}$ e $29^{\circ}C$). As curvas experimentais foram ajustadas com o modelo de Page e apresentaram um período inicial de taxa constante seguido por um período de taxa decrescente. O tempo de secagem para a condição mais amena foi de 90h e o tempo mínimo foi de 30h para as máximas temperatura e velocidade adotadas. As máximas e mínimas taxas de secagem obtidas foram de $2,6g.m^{-2}.h^{-1}$ e $0,3g.m^{-2}.h^{-1}$. Os resultados do estudo podem ser usados como base para estratégias de redução de emissões de poeira, resultando na melhoria da qualidade de vida da comunidade impactada pelo problema ambiental.

Palavras-chave: Túnel de secado, Dinâmica de secado, Sinter Feed, Generation de polvo.

Experimental Analysis of Iron Ore Fixed Bed Drying with External Atmospheric Air Flow

Abstract: The generation of dust due to the transport and handling of iron ore is a prominent environmental problem today. The reduction of emission levels has been the focus of many companies in the mineral sector, which implement solutions such as the use of suppressive products and the enclosure of transfer points. Dust emission is potentiated by local atmospheric conditions, which cause the evaporation of surface moisture from the wet ore, breaking the liquid bridges that hold the particles together. In addition to mass loss, the moisture gradient between the dried surface and the lower layers initiates and maintains moisture transport by capillarity and diffusion for surface evaporation. To define the sinter feed drying dynamics, an open section drying tunnel with a weighing system and humidity sensor was used to replicate three different atmospheric conditions ($1,5m.s^{-1}$ e $23^{\circ}C$; $3,0m.s^{-1}$ e $26^{\circ}C$; $4,5m.s^{-1}$ e $29^{\circ}C$). The experimental curves were fitted with Page's model and showed an initial period of constant rate followed by a period of decreasing rate. The drying time for the mildest condition was 90h and the minimum time was 30h for the maximum temperature and speed adopted. The maximum and minimum drying rates obtained were $2,6g.m^{-2}.h^{-1}$ and $0,3g.m^{-2}.h^{-1}$. The results of the study can be used as a basis for strategies to reduce dust emissions, resulting in an improvement in the quality of life of the community impacted by the environmental problem.

Keywords: Tunnel dryer, Kinetic drying, Sinter feed, Dust generation.

Análisis Experimental del Secado em Lecho de Mineral de Hierro com Flujo de Aire Externo

Resumen: La generación de polvo debido al transporte y manejo del mineral de hierro es un problema ambiental prominente en la actualidad. La reducción de los niveles de emisión ha sido el foco de muchas empresas del sector mineral, que implementan soluciones como el uso de productos supresores y el cerramiento de puntos de transferencia. La emisión de polvo es impulsada por las condiciones atmosféricas locales, que provocan la evaporación de la humedad superficial del mineral húmedo, rompiendo los puentes líquidos que mantienen las partículas interconectadas. Además de la pérdida de masa, el gradiente de humedad entre la superficie seca y las capas subyacentes inicia y mantiene el transporte de humedad por capilaridad y difusión a la evaporación superficial. Para definir la dinámica de secado de la alimentación de sinterización, se utilizó un túnel de secado de sección abierta con un sistema de pesaje y un sensor de humedad para replicar tres condiciones atmosféricas diferentes ($1,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e 23°C ; $3,0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e 26°C ; $4,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e 29°C). Las curvas experimentales se ajustaron con el modelo de Page y mostraron un período inicial de velocidad constante seguido de un período de velocidad decreciente. El tiempo de secado para la condición más suave fue de 90 horas y el tiempo mínimo fue de 30 horas para la temperatura y velocidad máximas adoptadas. Las tasas de secado máximas y mínimas obtenidas fueron $2,6\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ e $0,3\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Los resultados del estudio pueden ser utilizados como base para estrategias de reducción de emisiones de polvo, resultando en una mejora en la calidad de vida de la comunidad impactada por el problema ambiental.

Palabras clave: Tunnel dryer, Kinetic drying, Sinter feed, Dust generation.

INTRODUÇÃO

A mineração é um setor industrial que ocupa posição de destaque na economia brasileira, tendo relevante participação na composição do Produto Interno Bruto (PIB). Bento Albuquerque (2020), ministro de Minas e Energia, afirma que o setor foi responsável por quase 2,5% do PIB em 2020 e classifica como um dos mais promissores para a consolidação e fortalecimento da economia do País. Os bens minerais geram emprego e ocupam espaço nas exportações brasileiras, marcadas pela elevada comercialização de *commodities*. Em 2020 o país movimentou 1,151 bilhão de toneladas de carga, dos quais 688,9 toneladas correspondem à granel sólido e destes 52% correspondem a exportação do minério de ferro (ANTAQ, 2020). 72,8% do valor total da produção de substâncias metálicas é referente ao segmento do minério de ferro, totalizando R\$ 93,9 bilhões de reais, sendo 89,4% da produção concentrada nos estados do Pará e Minas Gerais (ANM, 2020).

Dentre os granéis exportados, o minério de ferro está entre aqueles com maior potencial poluidor atmosférico, dada presença de partículas finas, abaixo de $10\mu\text{m}$ e $2,5\mu\text{m}$, que podem entrar facilmente em suspensão no ar (COPELAND; KAWATRA 2005). As partículas PM_{10} são inaláveis e a maior parte é retida nas passagens nasais e vias aéreas superiores, já as partículas $PM_{2,5}$ são pequenas o suficiente para serem respiráveis e se alojarem na região alveolar podendo causar respostas inflamatória (TOMPSON, 2018).



Segundo Chaulya (2019), as maiores fontes emissoras de poeira nas atividades minerais correspondem a processos de britagem, perfuração, carregamento e descarregamento, transporte e armazenamento em pilhas de estocagem expostas ao vento. Segundo Santos Júnior (2018), a emissão de poeira no transporte ferroviário e portos, é preocupante pelo fato dos empreendimentos se localizarem próximos a comunidades ou centros urbanos, que são afetados pela poeira emitida. De acordo com Borba (2017), dentre as medidas estão a redução da velocidade dos trens nas áreas de comunidades, enclausuramento dos equipamentos nas áreas de transferência de materiais, umidificação dos materiais nos pátios de estocagem, carregamento e transporte, com o uso de supressores de pó junto com a umidificação, formando uma camada protetora do arraste eólico.

Os mecanismos da remoção da umidade iniciam por um período a taxa constante, seguido por um período de redução da taxa de secagem. Teng; Zhang (2019) dividem a evolução da secagem em dois períodos distintos: o primeiro período à uma taxa constante e um segundo período à taxa decrescente de evaporação de água contida no material particulado, tal qual mostrado na Figura 1.

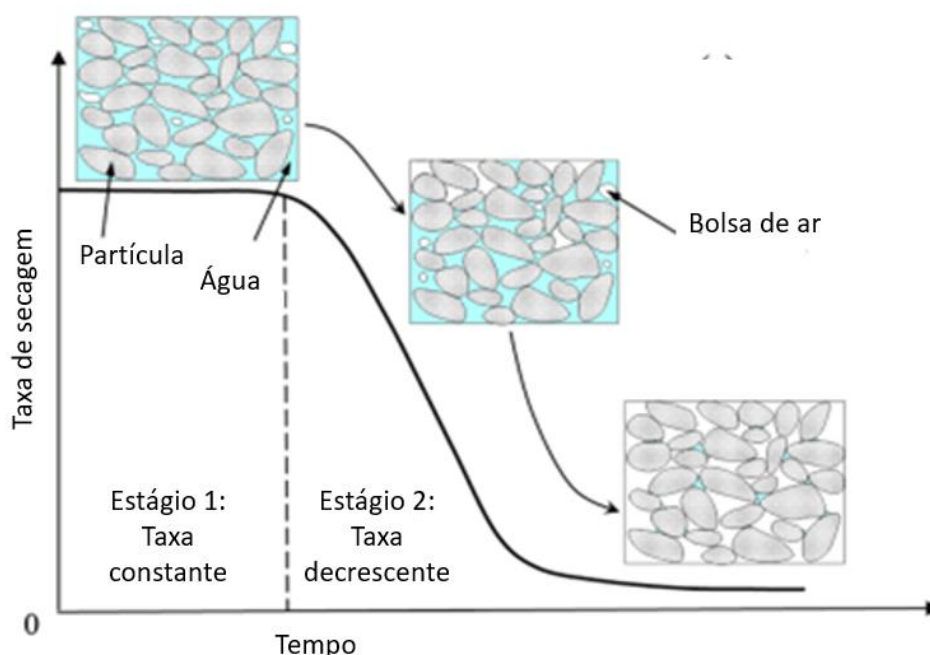


Figura 1: Taxa de secagem de sólidos a granel.

Fonte: Modificada de TENG; ZHANG (2019).

Santos Júnior; Fontana (2018), utilizaram um túnel de vento subsônico de seção aberta para avaliação da emissão de particulados em um vagão metálico na escala de 1:20, preenchido com minério de ferro *pellet feed*. Os resultados mostraram que a perda de massa é

proporcional à velocidade do vento e inversamente proporcional para a umidade do material.

Seguindo linha de pesquisa semelhante, Borba (2017) simulou arraste eólico em modelo de vagões de trem, avaliando diferentes produtos supressores de poeira aplicados sobre a superfície do minério umidificado em 7%. O modelo foi posicionado em uma seção de testes submetido a condições diversas, tais como chuva, insolação, vibração e vento. O estudo concluiu que o filme mais resistente às condições simuladas foi o polímero desenvolvido em parceria com a Universidade Federal do Estado do Espírito Santo.

Sousa Pinto; Moraes Júnior (2015) utilizaram uma bancada de secagem para avaliação dos mecanismos de secagem de *sínter feed* de minério de ferro em função das condições ambientais e da espessura do material. O equipamento utilizado é construído em acrílico e composto por um ar-condicionado e aquecedor, permitindo ajuste de temperatura e umidade relativa. O estudo permitiu identificar os mecanismos de água livre, capilaridade e difusão identificados pela descontinuidade das curvas de secagem obtidas.

Sousa Pinto; Souza (2020) levantaram experimentalmente as curvas de secagem de minérios de ferro *pellet feed* e *sínter feed* sob velocidade de $1m.s^{-1}$ e temperaturas de 50, 60, 70 e 80°C. As umidades iniciais, em base úmida, foram de 18% para o *pellet feed* e de 11% para *sínter feed*. As curvas experimentais ajustadas mostram o efeito da temperatura observado para o *pellet feed* é o da redução do tempo de secagem em função da elevação da temperatura. O *sínter feed* apresenta curvas de comportamento semelhante, embora o desvio padrão dos resultados serem maiores. Isto pode ser explicado pela maior presença de partículas grossas no meio, levando a grandes variações da área exposta a secagem.

Mohan; Talikdar (2014) utilizaram um túnel de vento equipado com resistências elétricas para avaliar a secagem de batatas. O equipamento é formado por um túnel de vento de seção aberta equipado com resistências elétricas entre o difusor e a contração. A massa de batata, posicionada na seção de testes sobre uma balança, foi submetido a temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, a $2m.s^{-1}$. Os resultados mostraram que a secagem é caracterizada basicamente por dois períodos de secagem, um constante e outro decrescente. A umidade final, ou umidade de equilíbrio foi maior para a menor temperatura. O resultado se repetiu para as demais configurações, mostrando que a taxa de evaporação aumenta com a temperatura devido a intensificação do mecanismo de evaporação.

Visando estudar o processo de secagem do minério de ferro submetido a condições atmosféricas, este estudo tem por objetivo gerar curvas experimentais de secagem do minério de ferro *sínter feed* submetido à diferentes condições atmosféricas reais. Para este objetivo,

será utiliza-se um túnel de secagem que fornece condições ambientais controladas para o desenvolvimento do estudo.

MATERIAL E MÉTODOS

Segundo BHANDARI (2015) a secagem é normalmente definida como um processo térmico de remoção de umidade de um produto sólido. Dois mecanismos ocorrem simultaneamente na secagem:

1. Transferência de calor entre o meio de secagem e a superfície do material úmido.
2. Transporte interno de umidade por meio de difusão de líquido.

Os dois processos descritos acima são ilustrados na Figura. 2.

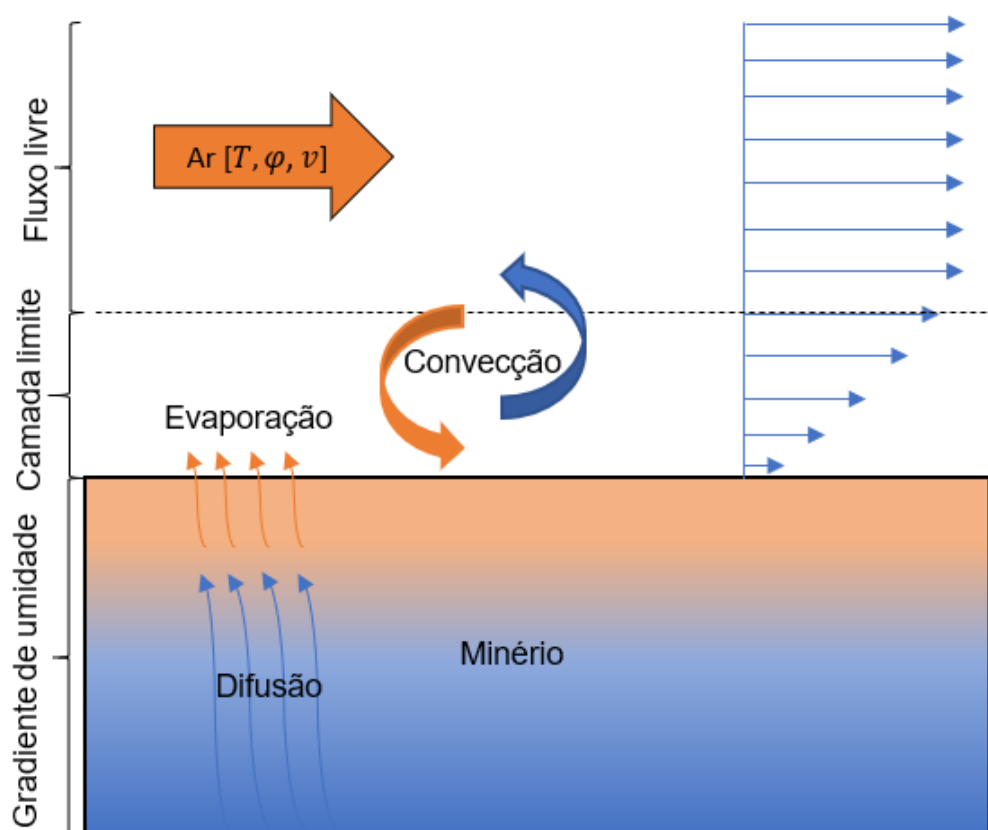


Figura 2: Representação da secagem convectiva.

Fonte: Modificada de H. T. SABAREZ (2016).

O processo de secagem é normalmente representado sob a forma de duas curvas característica: a curva de umidade em função do tempo, conforme indicado na Figura 3 (a) e através da curva de taxa de secagem em função da umidade, conforme indicado na Figura 3 (b).

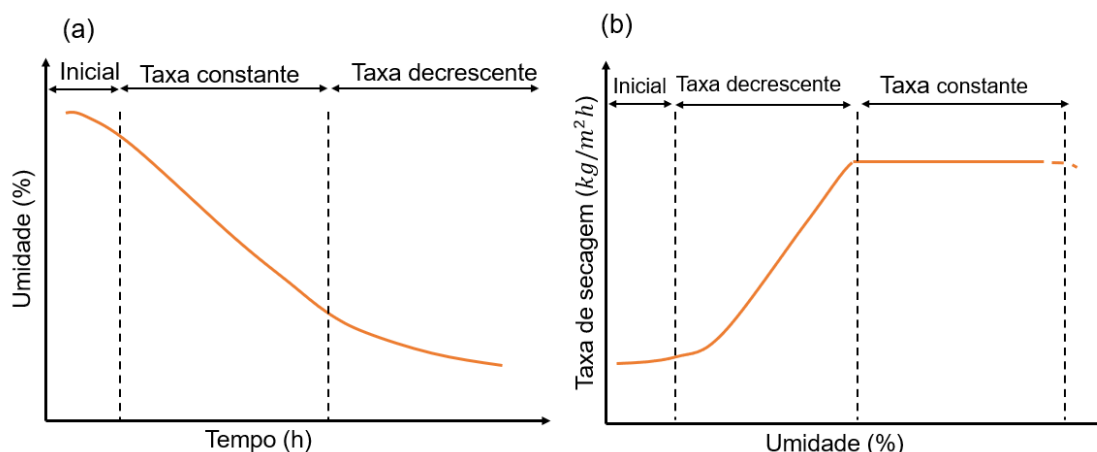


Figura 3: Curvas de secagem típicas. (a) secagem e (b) taxa de secagem.

Fonte: Modificada de H. T. SABAREZ (2016).

A curva (a) é obtida a partir das medições de umidade realizadas em intervalos fixos através de um sensor de umidade. O intervalo de medição depende do tempo total da secagem, isto é, processos com mais de 60h de ensaio. A curva (b), representa a taxa de secagem, e segundo (MUJUMDAR, 2014) pode ser expressa pela taxa de variação de umidade no tempo, massa inicial e área superficial em contato com o ar de secagem. A Equação 1 é usada para o cálculo da taxa de secagem em função da área, massa inicial e a taxa de variação da umidade.

$$T_s = \frac{m}{A} \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

Em que,

- T_s é a taxa de secagem expressa em $g \cdot m^{-2} \cdot min$ ou $kg \cdot m^{-2} \cdot h$.
- m é a massa úmida, em kg ou g .
- A é a área superficial em contato com o ar quente, em m^2 .
- $\frac{dU}{dt}$ é a taxa de variação da umidade no intervalo de medição.

O gráfico experimental (b) geralmente é ajustado por modelos matemáticos baseados nos estudos de LEWIS (1921) e SHERWOOD (1936). Os principais modelos empregados para o ajuste de curvas de secagem convectiva são indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Modelos matemáticos

Modelo	Autor
$\frac{U_t - U_{eq}}{U_0 - U_{eq}} = \exp^{-kt}$	Newton, (1921)
$\frac{U_t - U_{eq}}{U_0 - U_{eq}} = \exp^{-kt^n}$	Page (1949)
$\frac{U_t - U_{eq}}{U_0 - U_{eq}} = a \exp^{-kt}$	Hederson & Pabis (1961)
$\frac{U_t - U_{eq}}{U_0 - U_{eq}} = a \exp^{-kt} + c$	Logarítmico (2003)
$\frac{U_t - U_{eq}}{U_0 - U_{eq}} = a \exp^{-kt} + bt$	Midilli e outros (2002)

Fonte: Autoria própria.

Para selecionar o modelo que melhor representa a cinética de secagem, normalmente utilizam-se três critérios de ajuste THENG, et al. (2021), são eles: o coeficiente de correlação (r^2), conforme indicado na Equação 2, a raiz do erro quadrático médio (RMSE) indicado pela Equação 3 e a distribuição qui-quadrado (χ^2) dada pela Equação 4.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [RU_{model,i} - RU_{exp,i}]^2}{\sum_{k=1}^N \left[\frac{\sum_{i=1}^N RU_{model,i}}{N} - RU_{exp,i} \right]^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [RU_{model,i} - RU_{exp,i}]^2} \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [RU_{model,i} - RU_{exp,i}]^2}{N - z} \quad (4)$$

Em que,

- $RU_{exp,i}$ é a razão de umidade experimental.
- $RU_{model,i}$ é a razão de umidade do modelo.
- N , é o número de observações.
- z , é o número de parâmetros modelo.

A razão de umidade RU é a razão entre a diferença da umidade no tempo (t) menos a umidade final dividida pela diferença entre a umidade inicial e a umidade final. A equação 5 é

utilizada para calcular a razão de umidade.

$$RU = \frac{(U_{atual} - U_{equilíbrio})}{(U_{inicial} - U_{equilíbrio})} \quad (5)$$

O modelo mais adequado é selecionado com base em um (r^2) próximo de 1.0 e $(RMSE)$ e (χ^2) abaixo de 0,001.

Para elaboração deste estudo utilizou-se um túnel de secagem subsônico, de seção aberta e equipado com ventilador e resistências elétricas, desenvolvido e projetado por SILVA, A.J.C.S (2021). A bancada dispõe de uma seção de testes de $0,2m \times 0,3m \times 0,75m$ onde se localizam sensores combinados de temperatura e umidade relativa do ar de sinal analógico 0~ 5V. Na base da seção estão localizados a balança sobre a qual será posicionado o sensor de umidade. A Figura 4 mostra o aparato experimental empregado.

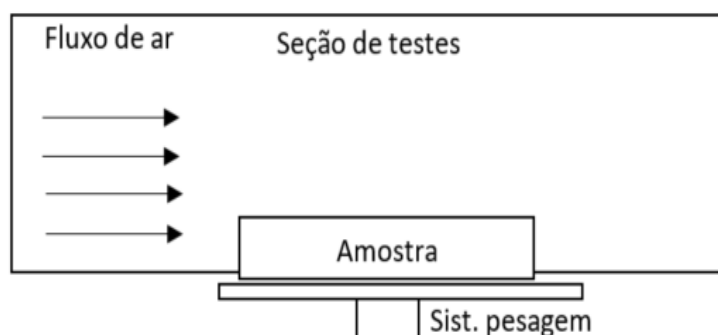


Figura 4: Aparato de ensaio.

Fonte: autoria própria.

O procedimento de ensaio consiste em umidificar o minério de ferro sinter feed em 8%, utilizando-se um misturador industrial. Em seguida retira-se e registra-se a massa de uma amostra do minério úmido que é imediatamente encaminhada para uma estufa, para posterior verificação de umidade inicial. O material é utilizado para preencher um sensor de umidade capacitivo desenvolvido por SANTOS JÚNIOR, (2020). As condições atmosféricas selecionadas compreendem aos máximos, médios e mínimos dados registrados e disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia ao longo dos anos de 2019 e 2020 na cidade de Vitória, no estado do Espírito Santo. A Figura 5 apresenta todas as configurações adotadas nos ensaios.

Nove diferentes configurações são empregadas para avaliar a velocidade e a temperatura sobre a dinâmica de secagem. O sensor de umidade preenchido com minério é posicionado sobre a balança após estabilização das condições climáticas. O registro de dados

de massa e de umidade são feitos de forma automática a cada uma hora. O ensaio é finalizado quando não são observadas diferenças entre três leituras consecutivas de umidade e de massa.

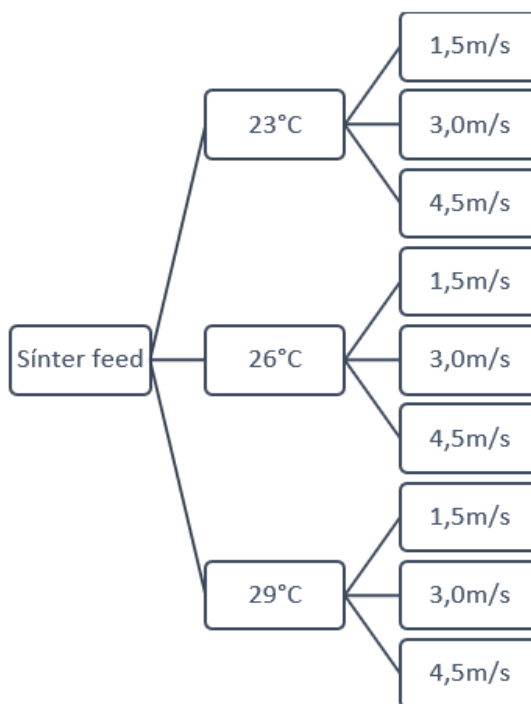


Figura 5: Configurações de ensaio.

Fonte: autoria própria.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as curvas experimentais mostradas nas Figuras 6 e 7 foram ajustadas com o modelo de Page, pois este apresentou melhor ajuste comparado aos demais modelos.

A Tabela 2 indica os valores do coeficiente de correlação, raiz quadrada do erro médio e coeficiente qui-quadrado. Observa-se em todas as curvas que o R^2 foi acima de 0,99 na terceira casa decimal, o RSME foi abaixo de duas casas decimais e o χ^2 apresentou valores abaixo de três casas decimais, indicando um bom ajuste das curvas experimentais aos modelos.

Tabela 2. Dados estatísticos do modelo de Page.

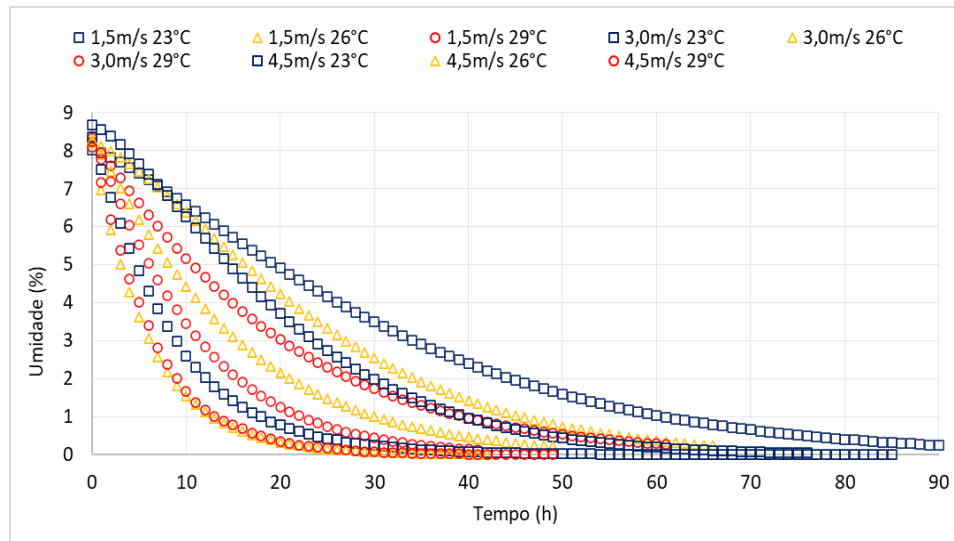
Configuração	R^2	RSME			χ^2	k	n
1,5m/s 23°C	0,9946	0,0052			0,0005	0,01	1,30
1,5m/s 26°C	0,9940	0,0051			0,0006	0,01	1,40

1,5m/s 29°C	0,9899	0,0057			0,0006	0,037	1,10
3,0m/s 23°C	0,9946	0,0041			0,0005	0,014	1,37
3,0m/s 26°C	0,9977	0,0014			0,0002	0,05	1,10
3,0m/s 29°C	0,9936	0,0037			0,0006	0,07	1,10
4,5m/s 23°C	0,9905	0,0086			0,0009	0,039	1,16
4,5m/s 26°C	0,9963	0,0034			0,0005	0,075	1,07
4,5m/s 29°C	0,9912	0,0077			0,0007	0,05	1,20

Fonte: autoria própria.

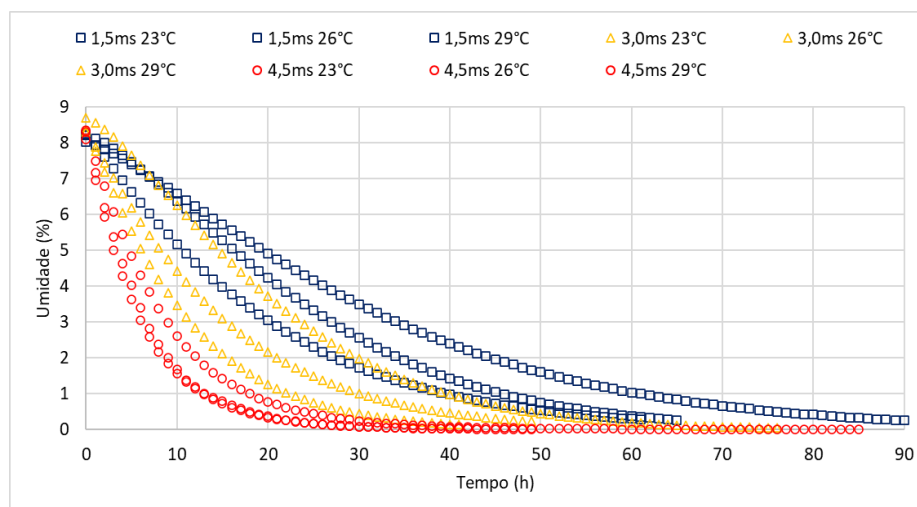
No Gráfico 1, comparam-se as curvas de umidade sob diferentes velocidades. Observa-se três conjuntos de curvas com temperatura constante de 23°C, 26°C e 29°C. Para todos os conjuntos, observou-se a diminuição do tempo de secagem em função do aumento da velocidade. Isso se deve a elevação da turbulência e coeficiente de convecção do ar de secagem que passa sobre a superfície do material.

Gráfico 1. Curvas de umidade versus tempo em temperatura constante.



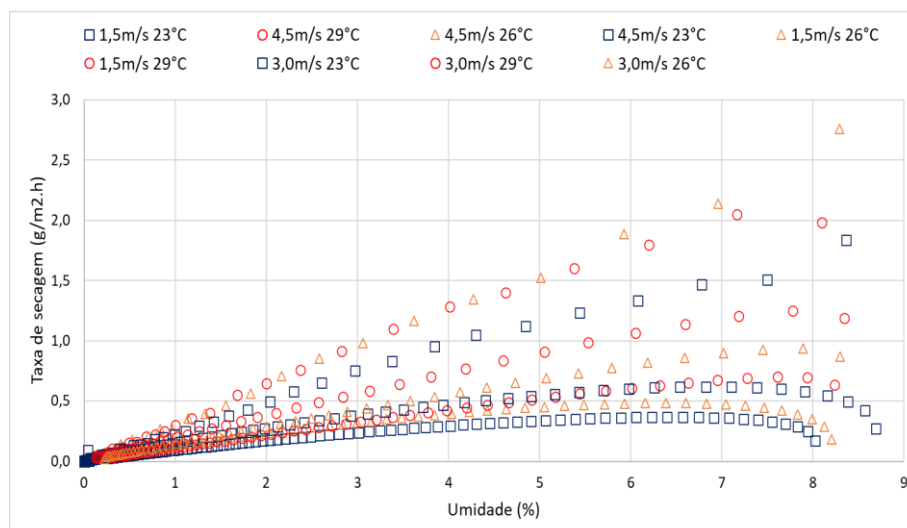
Fonte: autoria própria.

O Gráfico 7 apresenta três conjuntos de curvas com velocidade constante de $1,5m.s^{-1}$, $3,0m.s^{-1}$ e $4,5m.s^{-1}$. Novamente, observa-se diminuição do tempo de secagem em todas as curvas devido ao aumento da temperatura. Maiores temperaturas potencializam a evaporação superficial da umidade o material.

Gráfico 2. Curvas de umidade versus tempo em velocidade constante.

Fonte: autoria própria.

A configuração $1,5m.s^{-1}$ e $23^{\circ}C$ apresentou maior tempo de secagem (90h), devido à baixa temperatura e velocidades que induzem a secagem superficial lentamente. A curva de $4,5m.s^{-1}$ e 29° apresentou menor tempo de secagem (30h). Nessa configuração a temperatura superficial evapora a água superficial, criando um gradiente de umidade das camadas mais baixas e úmidas para as camadas superiores. De acordo com a Gráfico 3, a taxa de secagem máxima ocorreu na curva de menor duração, atingindo valor máximo de $2,6g.m^{-2}.h^{-1}$. Conforme esperado a menor taxa de secagem ocorreu na secagem mais longa, atingindo valores máximos de apenas $0,3g.m^{-2}.h^{-1}$

Gráfico 3. Taxa de secagem versus umidade.

Fonte: autoria própria.

Exceto pelas curvas de $3,0m.s^{-1}$ e $29^{\circ}C$ e $4,5m.s^{-1}$ e $29^{\circ}C$, observou-se um período inicial de taxa crescente de secagem, correspondente ao período de aquecimento da superfície até a temperatura com o ar de secagem, seguido por um segundo período à taxa constante de secagem, seguido por um período de taxa decrescente até atingir a umidade de equilíbrio, ponto em a condição ambiental não é mais suficiente para manter o transporte interno de água no minério úmido. A inexistência do período de taxa crescente nas curvas com maiores taxas de secagem pode ter ocorrido em intervalo menor que 1h, que não é capturado pelos pontos da curva.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi a investigação da dinâmica de secagem do sinter feed submetido a condições ambientes controladas. A bancada experimental permitiu a realização de ensaios com três diferentes temperaturas e três diferentes velocidades do ar de secagem que replicam condições atmosféricas reais. Todas as curvas experimentais foram ajustadas com o modelo de Page, em que todas apresentaram r^2 acima de 0,99, $RSME$ abaixo de 0,009 e χ^2 abaixo de 0,0007. Observou-se notadamente que a elevação da temperatura e da velocidade do meio de secagem potencializam a taxa de secagem do material, reduzindo o tempo com que o material atinge a umidade de equilíbrio. Como esperado, as maiores taxas de secagem ocorreram nas condições de maiores temperaturas e velocidades, atingindo valores de $2,6g/m^2.h$ e mínimos de $0,3g/m^2.h$ para as condições atmosféricas mais amenas. Os resultados do estudo podem ser utilizados como base para estratégias de redução de emissões de particulados, resultando na melhoria da qualidade de vida da comunidade impactada pelo problema ambiental.

AGRADECIMENTOS

A empresa Vale S.A pelo apoio financeiro. Artur José Cunha da Silva pela composição e revisão do artigo, desenvolvimento do aparato do experimento e tratamento de dados. Aos alunos Hemerson da Conceição Wanzeler e Ryan Luiz Lousada Rodrigues que ajudaram na execução dos experimentos. Ao engenheiro Arthur dos Reis Lemos Fontana pela ajuda na análise dos dados experimentais. Ao professor André Luís Amarante Mesquita pela

orientação e supervisão do trabalho e ao engenheiro Ronaldo Menezes dos Santos Júnior pela revisão do artigo e colaboração no planejamento do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTAQ. Relatório de gestão 2020, <https://nuvem.antaq.gov.br/index.php/s/BSOAHXnfgldGr0G>, acessado em março de 2022.

Anuário Mineral brasileiro: principais substâncias metálicas 2020, Agência Nacional de Mineração, https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2020_ano_base_2019_revisada2_28_09.pdf. Acessado em março de 2022.

ALBUQUERQUE, Bento. Ministério de Minas e Energia, <https://www.gov.br/mme> Acessado em março 2020.

BORBA, M. V. S. Avaliação do uso de diferentes tipos de polímeros supressores de pó no controle de emissões atmosféricas durante o transporte de minério de ferro na EFVM – Estrada de Ferro Vitória a Minas. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico Vale / Programa de Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais. Belem, PA. 2017. 104f.

BHANDARI, Bhesh. Handbook of Industrial Drying, Edited by AS Mujumdar: CRC Press: Boca Raton, FL; 2015. ISBN: 978-1-4665-9665-8. 2015.

CHAULYA, S. K. et al. Air quality modelling for prediction of dust concentrations in iron ore mines of Saranda region, Jharkhand, India. Atmospheric pollution research, v. 10, n. 3, p. 675-688, 2019.

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

Desempenho do setor mineral em 2020 supera expectativas, GOVERNO FEDERAL, <https://www.gov.br/pt-br/noticias/financas-impostos-e-gestao-publica/2021/02/desempenho-do-setor-mineral-em-2020-supera-expectativas>, acessado em março de 2022.

EE, Cheak Theng et al. Drying Kinetics and Modelling of Convective Drying of Kedondong Fruit. ASEAN Journal of Chemical Engineering, v. 21, n. 1, p. 93-103, 2021.

H. T. SABAREZ. Airborne ultrasound for convective drying intensification. Innovative Food Processing Technologies, Woodhead Publishing, 2016, Pages 361-386.

Henderson S M; Pabis S (1961). Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. Journal of Agricultural Engineering Research, 6(3), 169–174.

INMET, <https://mapas.inmet.gov.br/>, acessado em março de 2021.

TENG J. *et al.* An analytical model for evaporation from unsaturated soil, Computers and Geotechnics, Volume 108, 2019, Pages 107-116.

LEWIS, L.W. The rate of drying of solid materials. Industrial Engineering Chemistry, v.13, n. 1, p. 427-432, 1921.

MUJUMDAR, Arun S. Handbook of Industrial Drying. 2014, 1334p.

MIDILLI, ADNAN; KUCUK, HAYDAR; YAPAR, Z. İ. Y. A. A new model for single-layer drying. Drying technology, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.

Page, G.E. (1949) Factors Influencing the Maximum Rate of Air Drying Shelled Corn in Thin-Layers. M.S. Thesis, Purdue University, West Lafayette.



SANTOS JÚNIOR, R.M.; FONTANA, A.R.L.; SILVA, A. J. C. S; MESQUITA, A. L.A; GONTIJO, C.F. Estudo do arraste eólico em minério de ferro tipo Pellet Feed simulando o transporte ferroviário em túnel de vento. ABMWeek, ed.19ª, São Paulo, 2018, 12p.

SANTOS, G. A. Desenvolvimento de um sensor capacitivo para monitoramento da umidade do minério de ferro em protótipo de vagão de trem em escala reduzida. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto / Programa de Pós-graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Ouro Preto, MG. 2020 - 107f.

SHERWOOD, T. C.; BOWERS, Linwood M. The effect of ovarian hormone on the basal metabolism of experimental hyperthyroid rats. American Journal of Physiology-Legacy Content, v. 115, n. 3, p. 645-650, 1936.

SILVA, A.J.C.S. Desenvolvimento de um túnel para secagem e emissão de minério em condições controladas. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará / Programa de Pós-graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, Pa. 2021 - 100f.

SOUSA PINTO, T.C.; JÚNIOR, D.M; LIA, L. R. B.; FILHO, L.S.L. Mecanismos de secagem visando a redução de umidade em sinter feed de minério de ferro. ABMWeek, ed. 18º, São Paulo, 2018. ISSN 2176-3135.

SOUZA PINTO, T. C. et al. Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed. Drying Technology, v. 39, n. 10, p. 1359-1370, 2021.

SANTOS JÚNIOR, R.M. Procedimentos experimentais para avaliação da emissão de poeira em manuseio de minério. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará / Programa de Pós-graduação em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, Pará, 2018 – 201f.

THOMPSON, J. E. Airborne particulate matter: human exposure and health effects. Journal of Occupational and Environmental Medicine, v. 60, n. 5, p. 392-423, 2018.

TOĞRUL, İnci Türk; PEHLIVAN, Dursun. Modelling of drying kinetics of single apricot. Journal of Food Engineering, v. 58, n. 1, p. 23-32, 2003.

V. P. Chandra Mohan, *et al.* Experimental Studies for Convective Drying of Potato, Heat Transfer Engineering, 2014, 35:14-15, p1288-1297, 2014.