



SECAGEM CONVECTIVA DE MINÉRIO DE MANGANÊS

LETÍCIA F. HIDALGO^{1*}, THIAGO C. S. PINTO², ALFREDO M. SARKIS²,
THIAGO F. PÁDUA¹, RODRIGO BÉTTEGA¹

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química,
Departamento de Engenharia Química

²Instituto Tecnológico Vale - ITV

*e-mail: leticia.ferraresi@gmail.com

RESUMO - O minério de manganês tem ampla utilização no setor siderúrgico para a produção de aço com alta qualidade. Entre a extração junto às minas até sua exportação, o minério passa por processos que afetam sua umidade. A umidade pode ser útil na redução da geração de finos e consequentes perdas ou risco ambiental durante o transporte. Entretanto, elevados valores de umidade prejudicam operações de manuseio e transporte por navios. Dessa forma, o presente trabalho avaliou a secagem convectiva do minério de manganês em diferentes umidades iniciais (0,25, 0,33 e 0,43 b.s.) e temperaturas (70, 80 e 90 °C). Foi utilizado material com granulometria inferior a 1 mm, proveniente da mina do Azul no Pará. Nas condições avaliadas, o minério apresentou um período bem definido de secagem a taxa constante, seguido do período a taxa decrescente, com valores de umidade crítica próximos de 0,18 b.s. Foram observadas diferenças estruturais no minério de acordo com sua umidade, com tendência a aglomeração para valores de 0,33 e 0,43 b.s., as quais podem ter influenciado nas maiores taxas durante o período constante. O modelo de Overhults foi ajustado aos dados de secagem do período decrescente com valores de R^2 entre 0,9946 a 0,9979.

INTRODUÇÃO

O minério de manganês é amplamente utilizado para a produção de ferroligas consumidas no setor siderúrgico, para aumento da resistência mecânica e melhoria da temperabilidade e da ductilidade do aço. Associado a teores mais elevados de enxofre, o minério também facilita a usinagem e garante melhor acabamento superficial aos aços (Santana, 2009; Tangstad, 2013). Apesar de grande parte da produção de manganês ser destinada ao setor de siderurgia, sua empregabilidade ainda inclui a fabricação de fertilizantes, vidros, cerâmicas, rações animais, carros, pilhas e baterias, por exemplo (Dias, Caxito, 2018; Sampaio *et al.*, 2008). Por sua alta aplicabilidade e carência de um substituto econômico viável, o conhecimento das características do minério de manganês se faz

necessário para aprimorar seu processamento industrial (Afonso, 2019; Reis *et al.*, 2010).

Após a extração junto às minas, os produtos da mineração passam por processos industriais de moagem e beneficiamento, antes de serem transportados por ferrovias até os portos, onde são embarcados em navios para exportação. Nesses produtos, a quantidade de água pode variar de acordo com o estado natural do minério na fase de extração, com a rota de processamento que normalmente é realizada a úmido, com as condições climáticas durante o transporte ferroviário e a estocagem nos pátios dos portos (Wu *et al.*, 2010).

Por um lado, algum valor residual de umidade nos minérios pode ser especialmente útil para minimizar a geração de partículas finas e, consequentemente, reduzir as perdas durante o transporte ferroviário das mineradoras aos terminais portuários (Chaves, 2012). Por outro

lado, elevados valores de umidade nos minérios são indesejados para operações de manuseio e transporte por navios (Figueira *et al.*, 2010).

Segundo a regulamentação internacional para sólidos a granel, regida pela IMO (*International Maritime Organization*), minérios não podem ser transportados por navios quando exibem umidade acima do valor limite (*Transportable Moisture Limit – TML*) por razões de segurança (Munro; Mohajerani, 2015). Consequentemente, podem ocorrer interrupções no carregamento de navios, quando os produtos não estiverem nas condições adequadas para embarque, o que ocasiona atraso para sua exportação e considerável perda por lucro cessante. Maiores valores de umidade nos minérios aumentam os custos de transporte devido ao peso da carga de água, além de diminuir seu valor comercial (Souza Pinto *et al.*, 2020).

Por esses motivos, o aprimoramento das operações de secagem pode garantir um valor de umidade conveniente para que os produtos minerais sejam comercializados e transportados. Consequentemente, essa melhoria pode reduzir os custos e as perdas ao longo do processamento, além de resultar em maior valor agregado (Singh *et al.*, 2020).

A redução moderada da umidade nos produtos na mineração pode gerar ganhos a indústria mineradora, tais como: (i) aumento da capacidade de produção, uma vez que o espaço liberado pela água pode ser ocupado por uma maior massa de minério; (ii) facilidades de manuseio; (iii) redução do custo unitário do frete por tonelada transportada; (iv) redução de penalidades pagas pelas mineradoras aos clientes em função de altos teores de umidade presente nos minérios; entre outros (Mujumdar, 2006).

A indústria mineradora tem buscado soluções tecnológicas para a redução da umidade em seus produtos, por meio de várias abordagens (Instituto Tecnológico Vale, 2022). Na linha de produção dos minérios, devido aos grandes volumes processados nas mineradoras, os custos de investimentos em novos equipamentos de secagem em grandes escalas podem se tornar elevados. Nesse contexto, uma vez conhecida as características de secagem dos minérios em diferentes condições operacionais, os equipamentos já existentes em linha podem

ser adequados como unidades de secagem em uma etapa anterior à construção de protótipos e, dessa forma, aproveitar as operações unitárias já existentes no processamento.

Sistemas de secagem mais econômicos e mais eficientes em termos de transferência de massa e calor se enquadram nas necessidades do setor de mineração (Chaedir *et al.*, 2021). Porém, os trabalhos existentes nesta área são escassos e poucos na literatura abordam a secagem do minério de manganês e os principais fenômenos envolvidos nesse processo. Du *et al.* (2020) analisou a secagem do minério de manganês por micro-ondas. Em seu trabalho, o aumento do tamanho das partículas facilitou a redução de umidade, sugerindo que a eficiência de secagem é proporcional à energia de micro-ondas absorvida por unidade de área superficial.

Nesse contexto, o presente trabalho objetivou avaliar a secagem do minério de manganês em estufa de convecção forçada com renovação de ar para diferentes condições iniciais de umidade e temperaturas de processo. Os resultados foram avaliados segundo as cinéticas e as curvas de taxas de secagem para as diferentes condições experimentais. Os principais resultados desta pesquisa visam a compreender o comportamento do minério de manganês nas condições de secagens estudadas.

MATERIAL E MÉTODOS

Minério de manganês

As amostras *in natura* do minério de manganês foram fornecidas pelo Instituto Tecnológico Vale (ITV), provenientes da mina do Azul na Serra Norte de Carajás no Estado do Pará. O termo *in natura* se refere ao material em estoque, armazenado em tonel lacrado e recebido diretamente do ITV.

O minério fornecido possuía grande heterogeneidade de tamanhos e formas. Em termos estruturais, havia no material sólidos macios (maleáveis), rochas rígidas e particulados finos.

A fim de estudar os componentes do material e garantir reprodutibilidade para as análises deste trabalho, foi utilizado o minério de manganês com diâmetro de partícula inferior

a 1 mm, o qual constitui os aglomerados macios observados no material *in natura*.

A Figura 1 apresenta um exemplo de aglomerado de minério de manganês, que se torna quebradiço quando seco, e seus particulados obtidos após fragmentação manual.

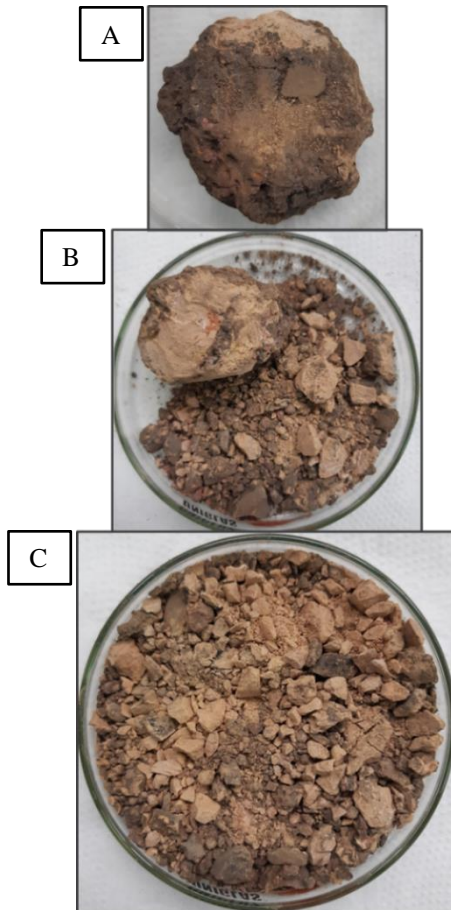


Figura 1: A) Aglomerado seco e quebradiço de minério de manganês. B e C) Fragmentação manual do aglomerado.

Para separação do material, o minério *in natura* foi previamente seco em estufa a 105 °C por 24 horas. Em seguida, foi separado em peneira granulométrica Retsch (AS200 control USA), utilizando a malha com abertura de 1,0 mm (peneira Tyler, mesh 18). Na Figura 2, é possível observar as diferentes frações de minério de manganês obtidas após o peneiramento em malhas com aberturas de 4,00 (mesh 5) e 1,00 mm.

No processo de beneficiamento do minério de manganês, a fração de sólidos com faixa granulométrica abaixo de 1 mm é geralmente confinada em bacias de rejeito (Gomes-Pimentel *et al.*, 2022). Em alguns casos, segundo Sampaio *et al.* (2008), a

separação por gravidade e a flotação são utilizadas para recuperar o manganês contido nessa fração. Em 2010, a Vale começou o processo de recuperação de finos na mina de manganês do Azul no Pará, os quais antes eram depositados em pilhas de estéril ou em barragens de rejeitos como sobras do processo de mineração (Vale, 2022).

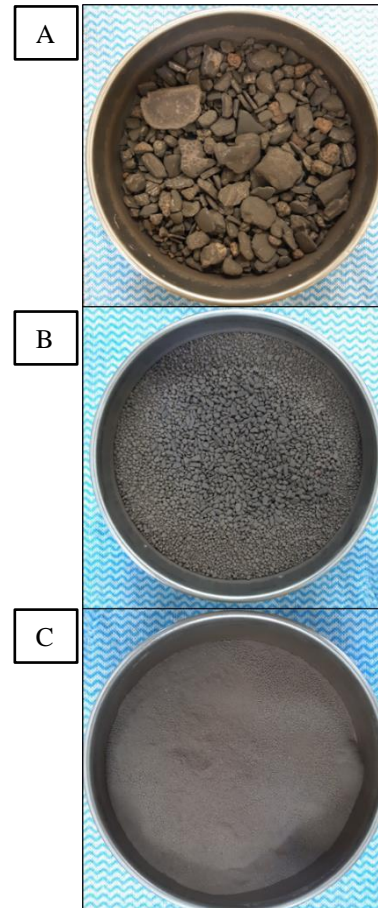


Figura 2: Peneiramento do minério de manganês seco. A) Rochas rígidas na peneira com abertura de 4,00 mm. B) Aglomerados rígidos na peneira com abertura de 1,00 mm. C) Porção de finos.

Umidificação do material

O minério de manganês com diâmetro inferior a 1,00 mm era umidificado para os experimentos de secagem, segundo o método de umidificação para minérios utilizado por Souza Pinto *et al.* (2020).

Após a secagem em estufa a 105 °C por 24 horas, o material seco era pesado em amostras de aproximadamente 20 gramas, as quais eram inseridas em sacos de polipropileno tipo *zip-lock*. Estes eram devidamente fechados e colocados em dessecador, no qual as amostras aguardavam o procedimento de umidificação.

Para o material em questão, o procedimento inicial de secagem seguido do armazenamento em dessecador garantia que a umidade do material fosse mantida em condições próximas à umidade zero por semanas. Assim, foi possível desprezar a umidade inicial da amostra para o procedimento de umidificação.

Nesse procedimento, o volume de água necessário para que as massas pesadas alcançassem a umidade desejada era gotejado no material em pó, dentro dos sacos tipo *zip-lock*. O gotejamento era realizado de modo não localizado e pausado esporadicamente para homogeneização e rompimento de aglomerados, momento em que o material era misturado manualmente ao pressionar o saco de polipropileno. Após a inserção do volume necessário de água, o saco fechado era armazenado em condição ambiente por 24 horas para uniformização da umidade.

As amostras secas de minério foram umidificadas para três condições iniciais de umidade em 20, 25 e 30 % em base úmida, que correspondem a 0,25, 0,33 e 0,43 em base seca.

Secagem em estufa

As amostras de minério de manganês úmidas foram submetidas aos experimentos de secagem em estufa de convecção forçada, com renovação de ar (Tecnal, TE-349/1), nas temperaturas de 70, 80 e 90 °C (com réplicas para cada condição inicial).

Em cada secagem, a geometria do material era padronizada por meio de sua extrusão em malha de 4,76 mm (peneira *Tyler, mesh 4*), com posterior distribuição uniforme sobre uma placa de *Petri* com diâmetro de $(77,2 \pm 0,2)$ mm. Nesse momento, era realizado o registro inicial da massa úmida (balança A&D HR-60).

O aparato experimental utilizado nos experimentos de secagem está apresentado na Figura 3. A placa de *Petri* foi suspensa por uma corrente conectada à balança (Ohaus, PA214), que por sua vez ficava posicionada em uma plataforma sobre a estufa. A aquisição dos dados de pesagem era realizada em linha por conexão serial (RS-232) com computador (*software* da própria empresa fabricante da balança, Ohaus – SPDC Data Collection V2.03).



Figura 3: Aparato experimental.

A velocidade média do ar na região de suspensão da amostra era de $0,68 \pm 0,03$ m/s e foi mensurada com anemômetro de fio quente (AKSO AK833).

Após a secagem, as amostras eram inseridas em estufa (Fanem, modelo 315 SE) a 105 °C por 24 horas para medição da massa seca do material por método gravimétrico.

Tratamento dos dados experimentais

Devido à velocidade de aquisição (um dado armazenado a cada 0,0864 segundos), os dados experimentais brutos foram analisados por um programa desenvolvido em Scilab. O nível de ruído obtido nos valores de umidade era aceitável, mas levava a elevadas incertezas nos cálculos de taxa de secagem. Em outras palavras, o cálculo da derivada da umidade em relação ao tempo era particularmente sensível ao ruído nos dados de umidade.

Para permitir a análise de resultados, os dados de umidade foram filtrados por média móvel. As janelas foram previamente testadas e optou-se por utilizar a janela de 700 dados nas análises (correspondente ao tempo de 60,48 segundos). A alteração da janela em algumas centenas de dados de umidade somente alterava a amplitude do ruído, mas não implicou em alterações relevantes para os propósitos da análise de resultados.

Cinética de secagem

Os dados experimentais foram analisados por meio das curvas de cinética de secagem referentes ao comportamento do adimensional de umidade (MR) em função do tempo, calculado segundo a Equação 1:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

onde X é a umidade do material em determinado instante t , enquanto X_0 e X_e correspondem às umidades inicial e de equilíbrio, respectivamente.

Considerando as réplicas de cada condição experimental, foram calculados os valores médios de umidade em base seca. Esses dados foram filtrados e utilizados para o cálculo da taxa de secagem por diferenças centrais (Rice, Du; 2012).

Os valores de taxa foram analisados em função da umidade em base seca, de onde foram obtidos visualmente os valores de umidade crítica.

Para o período de secagem a taxa decrescente e considerando o sistema em camada fina, a equação de cinética de secagem de Overhults (Equação 2) foi ajustada aos dados experimentais por regressão não-linear utilizando mínimos quadrados com a ferramenta “Solver” do MS Excel:

$$MR = e^{-(k t)^n} \quad (2)$$

Nessa equação, k é a constante de secagem (min^{-1}), t é o tempo de secagem (min) e n é uma constante empírica adimensional.

Para verificar a qualidade de ajuste do modelo aos dados experimentais, foram calculados o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro-médio (RMSE), Equação 3, e aplicado o teste do qui-quadrado (χ^2), Equação 4.

$$RMSE = \left[\sum_{i=1}^N \frac{1}{N} (MR_{exp,i} - MR_{calc,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(MR_{exp} - MR_{mod})^2}{(N - np)} \quad (4)$$

Nessas equações, N é o número de dados experimentais e np o número de parâmetros determinados pelo modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras úmidas de minério de manganês estão apresentadas na Figura 4, para as condições de umidade em 0,25, 0,33 e 0,43 b.s., após extrusão para padronização da forma.

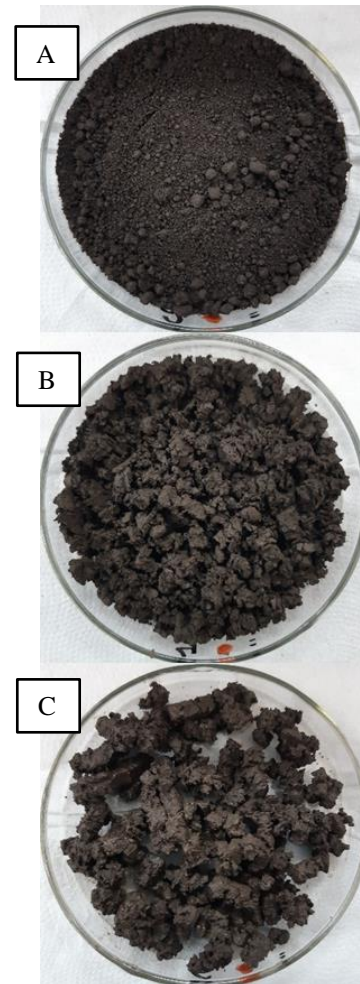


Figura 4: Minério de manganês com umidade em 0,25 (A), 0,33 (B) e 0,43 b.s. (C), após passagem pela malha de 4,76 mm.

O minério com umidade em 0,25 b.s. (Figura 4.A) formava alguns aglomerados ao passar pela extrusão. Tais partículas eram quebradiças e possuíam pouca coesão com o restante do material. Alguns desses aglomerados eram menores e passavam pela grade sem rompimento.

Com umidade de 0,33 b.s. (Figura 4.B), o minério já possuía maior coesão, que levava à aglomeração, e consistência maleável para modelagem. Nessa condição, o material era composto de pequenos aglomerados, alguns de forma mais alongada, que eram formados na passagem do sólido pela malha.

O material úmido em 0,43 b.s. (Figura 4.C) apresentou características similares às descritas anteriormente, mas seus aglomerados se aproximavam mais a uma pasta de maior escoabilidade e sem nenhuma presença de particulado fino. Assim, a passagem pela malha levava à formação de aglomerados extrudados e de forma bastante alongada.

De modo geral, o minério de manganês disposto para a secagem a 0,33 b.s. possuía características mais similares ao umidificado a 0,43 b.s., porém muito distintas da disposição do sólido à 0,25 b.s.

A Figura 5 apresenta o adimensional de umidade (MR) em função do tempo de secagem para as condições iniciais de 0,25, 0,33 e 0,43 b.s. nas temperaturas de 70 (A), 80 (B) e 90 °C (C), respectivamente, assim como a réplica correspondente para cada condição experimental. É possível constatar que o procedimento experimental apresentou boa reprodutibilidade dos resultados. Foi observado o comportamento típico do aumento do tempo de secagem com o aumento da umidade inicial do minério, para cada condição de temperatura.

Para uma mesma condição inicial de umidade, ocorreu a diminuição do tempo de secagem com o aumento da temperatura do processo, conforme esperado. Isso acontece porque o aumento da temperatura leva ao aumento da transferência de calor ao material, refletindo também em maior taxa de transporte de massa no processo de secagem.

A Figura 6 apresenta as taxas de secagem em função da umidade em base seca para as secagens com umidade inicial de 0,25, 0,33 e 0,43 b.s. na mesma temperatura de 70 (A), 80 (B) e 90 °C (C), respectivamente. A Figura 7 apresenta as taxas de secagem em função da umidade em base seca para as temperaturas de 70, 80 e 90 °C na mesma umidade inicial de 0,25 (A), 0,33 (B) e 0,43 b.s. (C), respectivamente. Nessas curvas, as taxas de secagens foram calculadas com base nos dados filtrados obtidos a partir do valor médio das réplicas realizadas para cada condição experimental.

As curvas de secagem (Figuras 6 e 7) indicam claramente três períodos de secagem: (i) período de aquecimento, (ii) período de taxa constante e (iii) período de taxa decrescente.

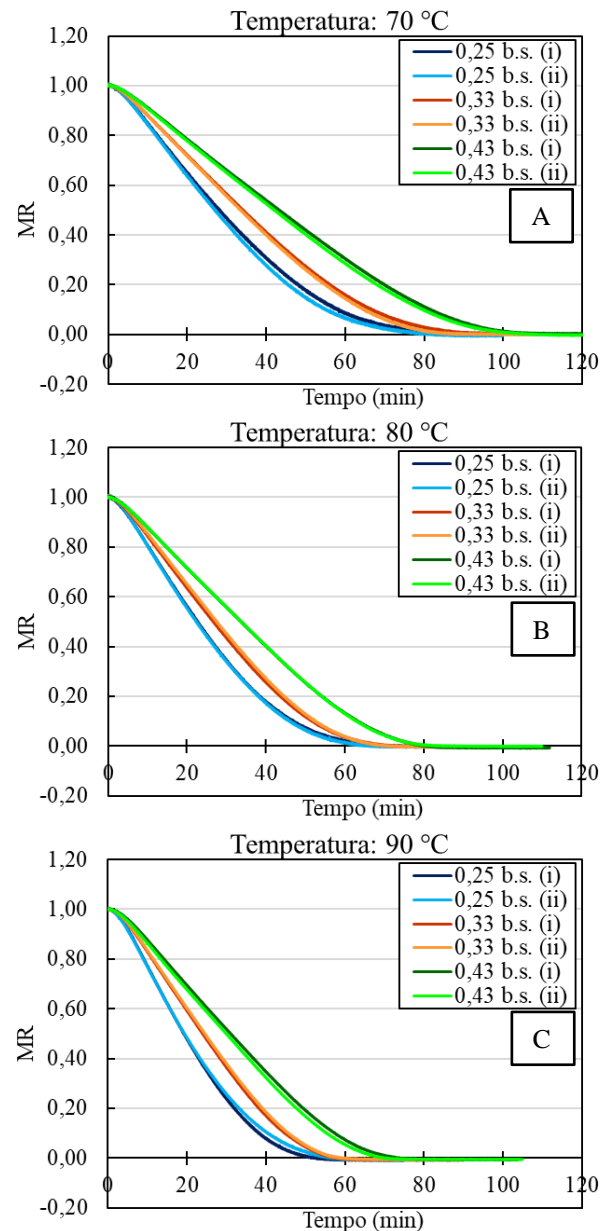


Figura 5: Adimensional de umidade em função do tempo para as condições iniciais de 0,25, 0,33 e 0,43 b.s. nas secagens a 70 (A), 80 (B) e 90 °C (C).

Para uma mesma condição de temperatura (Figura 6), as curvas de taxa de secagem em função da umidade em base seca se sobrepõem, especialmente para os experimentos com umidade inicial em 0,33 e 0,43 b.s. Para o experimento em 0,25 b.s., os resultados de taxa ficaram ligeiramente abaixo das curvas anteriores.

Tendo em vista esse resultado, os valores de umidade crítica para o minério de manganês foram determinados visualmente próximos à 0,18 b.s. nas secagens realizadas nesse trabalho.

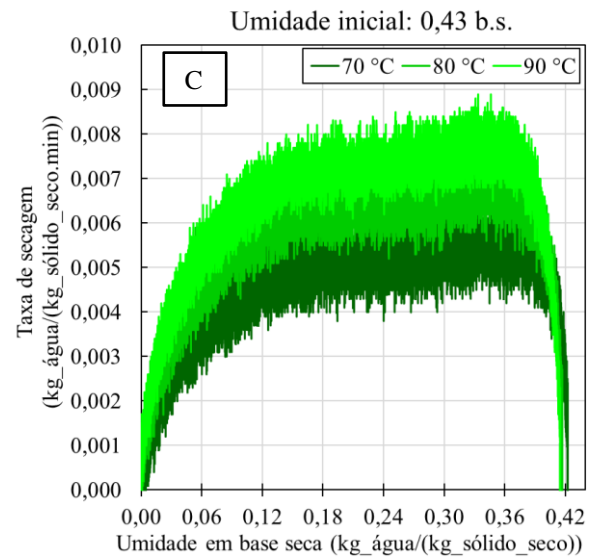
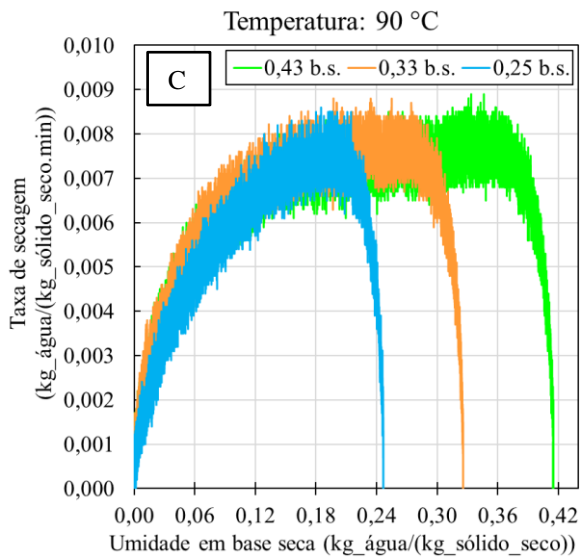
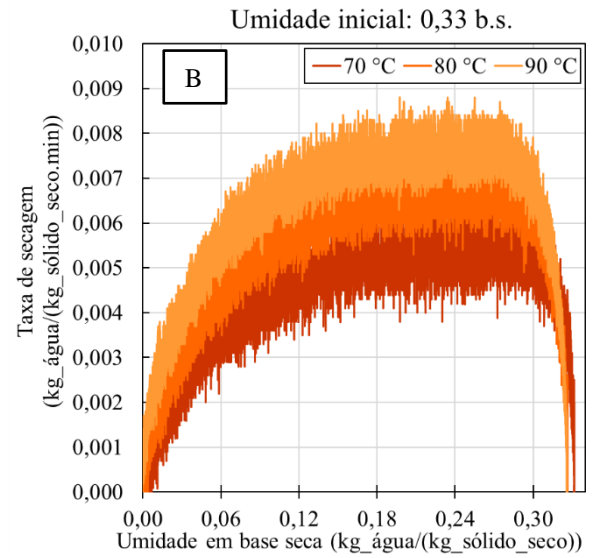
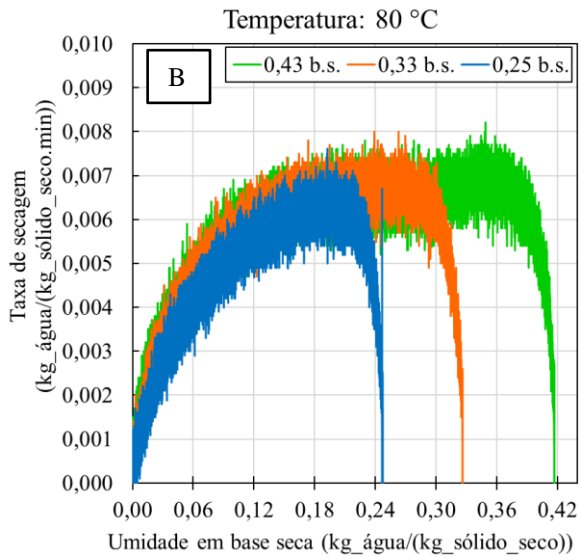
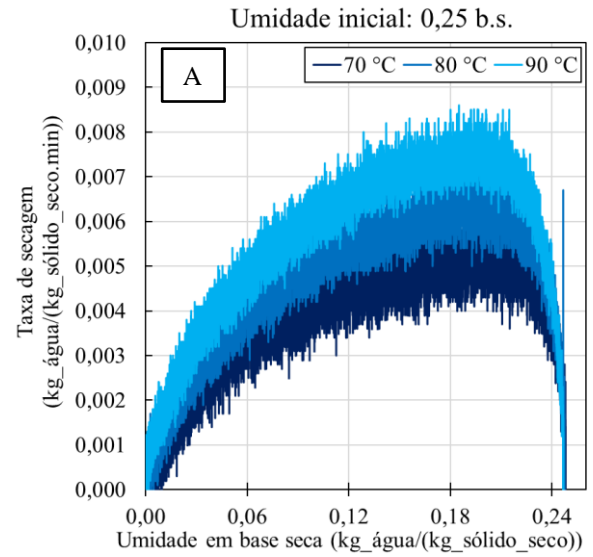
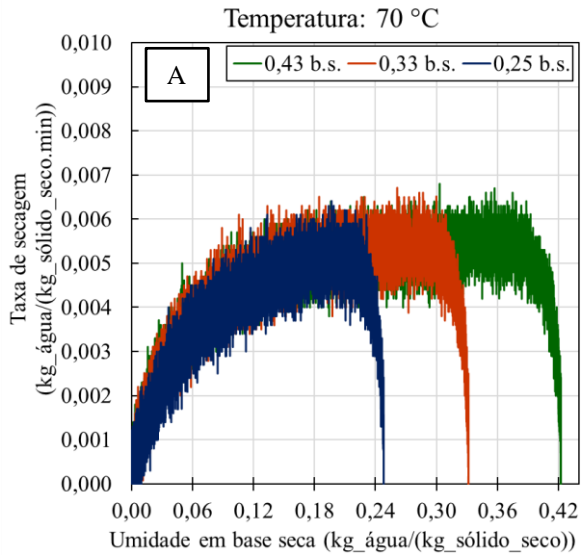


Figura 6. Taxa de secagem em função da umidade em base seca para as condições iniciais de 0,25, 0,33 e 0,43 b.s. nas temperaturas de 70 (A), 80 (B) e 90 °C (C).

Figura 7. Taxa de secagem em função da umidade em base seca para as temperaturas de 70, 80 e 90 °C, nas secagens com umidade inicial de 0,25 (A), 0,33 (B) e 0,43 b.s. (C).

Dessa forma, o aumento da umidade influenciou na duração da secagem durante o período de taxa constante. Nesse período, a secagem acontece como se água pura estivesse sendo removida, isso porque a água estaria de fato disponível na superfície do material ou sua reposição nesse local seria rápida o suficiente para não ocasionar decréscimo da película externa. Nesse sentido, a formação de aglomerado em umidades iniciais maiores (0,33 e 0,43 b.s.) podem ter permitido maior disponibilidade da água contida no minério de manganês.

Segundo a Regulamentação internacional para sólidos a granel, regida pela IMO, o minério de manganês configura uma carga muito pesada e, para a segurança de seu transporte, a umidade típica é de até 15 % em peso, que corresponde a umidade de 0,18 em base seca. Dessa forma, para as condições experimentais utilizadas nesse trabalho, o minério de manganês poderia ser seco durante o período de taxa constante para que atingisse a condição de transporte necessária. Esse resultado é particularmente importante por indicar um menor consumo de energia e conseqüentemente menor custo para os procedimentos de secagem em operações de mineração, uma vez que a remoção de água durante o período de taxa constante ocorre com maior facilidade se comparado com o período de taxa decrescente.

Para uma mesma condição de umidade inicial, foi observado que as taxas de secagem aumentaram com o aumento da temperatura do processo (Figura 7), refletindo a diminuição do tempo de secagem relatado anteriormente.

Para o período de taxa constante, a Tabela 1 apresenta os valores médios de taxa e o tempo aproximado para que as secagens atingissem o valor de umidade crítica em cada condição experimental.

Para as umidades iniciais de 0,33 e 0,43 b.s., as taxas foram similares para uma mesma temperatura avaliada. Esse resultado pode estar relacionado à similar disposição do minério sobre as placas de *Petri* para essas quantidades iniciais de água (Figura 4). Uma vez que sua passagem pela malha de 4,76 mm foi utilizada como forma de padronização da geometria.

Tabela 1. Taxa de secagem média e tempo aproximado até a umidade crítica para cada condição experimental.

Temperatura (°C)			
70			
Umidade (-) (b.s.)	0,25	0,33	0,43
Taxa de secagem (min ⁻¹)	0,0050	0,0053	0,0052
Desvio (min ⁻¹)	0,0004	0,0004	0,0004
Tempo (min)	16	31	49
Temperatura (°C)			
80			
Umidade (b.s.)	0,25	0,33	0,43
Taxa de secagem (min ⁻¹)	0,0062	0,0066	0,0066
Desvio (min ⁻¹)	0,0004	0,0004	0,0004
Tempo (min)	13	24	38
Temperatura (°C)			
90			
Umidade (b.s.)	0,25	0,33	0,43
Taxa de secagem (min ⁻¹)	0,0073	0,0075	0,0074
Desvio (min ⁻¹)	0,0004	0,0005	0,0004
Tempo (min)	11	22	34

Como a secagem no período de taxa constante está diretamente relacionada à geometria do material e ao escoamento do ar, os aglomerados formados em umidades iniciais maiores (0,33 e 0,43 b.s.) podem ter influenciado nos maiores valores de taxas durante esse período, comparado aos valores obtidos pelo material com umidade menor (0,25 b.s.), de partículas de tamanhos reduzidos e formação de camada mais compacta.

A formação de aglomerados ao extrudar o minério de manganês pela malha pode ter contribuído para o aumento da taxa de secagem no período constante devido ao aumento da área de contato com o ar. Desse forma, o aumento do contato entre o material e o ar de secagem pode ter influenciado os resultados para o período à taxa constante, em que a resistência ao transporte de massa relevante é a externa ao sólido, por meio da convecção.

Para as secagens com umidade inicial em 0,25 b.s., os períodos de secagem a taxa constante corresponderam de 18 a 20 % do tempo total para alcançar a umidade de equilíbrio. Para as secagens com 0,33 b.s., esse período representou de 28 a 37 % do tempo

total. E para as secagens com 0,43 b.s., o minério apresentou período constante que se estendeu entre 41 e 47 % do tempo total do processo.

Para o período de taxa decrescente, a Tabela 2 apresenta os parâmetros cinéticos para o ajuste exponencial da equação de cinética de secagem de Overhults (k e n), assim como o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro-médio (RMSE) e o teste do qui-quadrado (χ^2) para os ajustes das equações.

Tabela 2. Coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do erro-médio (RMSE), teste do qui-quadrado (χ^2) e parâmetros cinéticos para o ajuste exponencial pela equação de Overhults (k e n) para cada condição de secagem.

Temperatura (°C)		70		
Umidade (b.s.)		0,25	0,33	0,43
R^2		0,9979	0,9964	0,9948
RMSE		0,0108	0,0104	0,0101
χ^2		0,0001	0,0001	0,0001
k (min ⁻¹)		0,0291	0,0237	0,0184
n		1,6266	1,8798	2,1437
Temperatura (°C)		80		
Umidade (b.s.)		0,25	0,33	0,43
R^2		0,9978	0,9965	0,9947
RMSE		0,0113	0,0107	0,0106
χ^2		0,0001	0,0001	0,0001
k (min ⁻¹)		0,0356	0,0297	0,0234
n		1,6366	1,9122	2,1961
Temperatura (°C)		90		
Umidade (b.s.)		0,25	0,33	0,43
R^2		0,9976	0,9954	0,9946
RMSE		0,0124	0,0128	0,0110
χ^2		0,0002	0,0002	0,0001
k (min ⁻¹)		0,0416	0,0334	0,0260
n		1,6821	2,0287	2,2439

No geral, os valores de R^2 foram superiores 0,900 para todos os ajustes

realizados e variaram de 0,9946 a 0,9979. Os valores de RMSE variaram de 0,0104 a 0,0128 e os valores de χ^2 ficaram entre 0,0001 a 0,0002. Quanto mais próximo de um o valor de R^2 e mais próximo de zero os valores de RMSE e χ^2 , melhor a qualidade do ajuste.

Para um mesmo valor de temperatura, os valores do parâmetro k diminuíram e do parâmetro n aumentaram em função do aumento da quantidade de água inicial no minério. Para um mesmo valor de umidade inicial, os valores de ambos os parâmetros aumentaram com o aumento da temperatura de secagem, refletindo a influência da energia térmica no processo.

CONCLUSÃO

O minério de manganês com diâmetro inferior a 1 mm adquiriu características distintas de acordo com a umidade. Enquanto o sólido com umidade em 0,25 b.s. tinha características de material solto, nas umidades de 0,33 e 0,43 b.s., as amostras apresentaram maior coesão com tendências à aglomeração.

Nas cinéticas de secagem, foram observados os comportamentos típicos de aumento do tempo de secagem com o aumento da umidade inicial do minério, assim como redução do tempo com o aumento da temperatura do processo. Para todas as condições de umidade e temperatura, as amostras de minério secaram com períodos de taxa constante, seguidos do período de taxa decrescente, com valores de umidade crítica próximos de 0,18 b.s.

Para o período de secagem a taxa constante, as amostras com umidade inicial de 0,33 e 0,43 b.s. apresentaram valores de taxa semelhantes e maiores que a amostra com 0,25 b.s., em uma mesma temperatura de processo. Esse resultado está relacionado a padronização da forma do material e consequente disposição similar para as condições de umidade inicial maiores. Além disso, nessas amostras a formação de aglomerados pode ter favorecido o período de secagem a taxa constante por influenciar na geometria do material.

Para o período de taxa decrescente, os ajustes com a equação de cinética de secagem de Overhults apresentaram valores de R^2

próximos de um, assim como RMSE e χ^2 próximos de zero. Foi possível destacar a influência da energia térmica nas secagens, uma vez que ambos os parâmetros ajustados aumentaram com o aumento da temperatura.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradecemos o apoio do Instituto Tecnológico Vale – ITV e da VALE S.A. pelo fornecimento das amostras de material para o estudo.

NOMENCLATURA

k	constante de secagem (min^{-1})
n	constante empírica (-)
np	número de parâmetros
N	número de dados experimentais
MR	adimensional de umidade (-)
R^2	coeficiente de determinação
RMSE	raiz quadrada do erro-médio
t	tempo de secagem (min)
X	umidade (base seca)
X_0	umidade inicial (base seca)
X_e	umidade de equilíbrio (base seca)
χ^2	qui-quadrado

REFERÊNCIAS

AFONSO, J. A. (2019), Manganês no Brasil: descoberta, extração, consumo e comercialização numa perspectiva histórica, *Química Nova*, Vol. 42, n. 10, p.1172-1183.

CHAVES, A. P. (2012), Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, Bombeamento de Polpa e classificação, 4 ed. São Paulo, Oficina de Textos, Vol. 1.

CHAEDIR, B. A.; KURNIA, J. C.; SASMITO, A. P.; MUJUMDAR, A. S. (2021) Advances in dewatering and drying in mineral processing, *Drying Technology*, Vol. 39, n. 11, p.1667-1684.

DIAS, T. G.; CAXITO, F. (2018), Manganês. Recursos Minerais de Minas Gerais,

Ministério das Minas e Energia: Brasília, 2018, 16p.

DU, J.; GAO, L.; YANG, Y.; GUO, S.; CHEN, J.; OMRAN, M.; CHEN, G. (2020), Modeling and kinetics study of microwave heat drying of low grade manganese ore, *Advanced Powder Technology*, Vol. 31, n. 7, p.2901-2911.

FIGUEIRA, H. V. O.; LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. (2010), Britagem E Moagem. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento De Minérios. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, Cap. 4, 143-210.

GOMES-PIMENTEL, M.; SILVA, M. R. C.; VIVEIROS, D. C.; PICANÇO, M. S. (2022), Manganese Mining Waste as a Novel Supplementary Material in Portland Cement, *Materials Letters*, Vol. 309, 131459.

INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE. Redução de Umidade. Disponível em: <https://www.itv.org/projetos_mi/reducao-de-umidade/>. Acesso em: jun. 2022.

MUJUMDAR, A. S. (2006), Drying in Mineral Processing. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.) Handbook of Industrial Drying. 3. ed., Boca Raton: Taylor & Francis, Inc., Cap. 37, p.879-885.

MUNRO, M. C.; MOHAJERANI, A. (2015), Determination of the transportable moisture limit of iron ore fines for the prevention of liquefaction in bulk carriers, *Marine Structures*, Vol. 40, p.193-224.

REIS, E. L.; FARIA, G. L.; ARAÚJO, F. G. S.; TENÓRIO, J. A. S.; VIEIRA, C. B. JANNOTTI JÚNIOR, N. (2010), Caracterização de uma tipologia de minério de manganês do Brasil, *Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, Vol. 63, n. 3, p.517-521.

RICE, R. G.; DO, D. D. (2012), Applied mathematics and modeling for chemical engineers. 2. ed. John Wiley & Sons, Inc., 383 p.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; DUTRA, A. J. B.; PENNA, M. T. M. (2008), Manganês. In: Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, p.633-648.

- SANTANA, A. L. (2009), Mineração de Metais Ferrosos. In: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Economia Mineral do Brasil – 2009. Distrito Federal: Diretoria de Desenvolvimento e Economia Mineral (DIDEM), 2009. Cap. 3, p.117-128.
- SINGH, V.; CHAKRABORTY, T.; TRIPATHY, S. K. (2020), A Review of Low Grade Manganese Ore Upgradation Processes, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, Vol. 41, n. 6, p.417-438, 2020.
- SOUZA PINTO, T. C.; SOUZA, A. S.; BATISTA, J. N. M.; SARKIS, A. M.; LEAL FILHO, L. S.; PÁDUA, T. F.; BÉTTEGA, R. (2020), Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed, Drying Technology, p.1-12.
- TANGSTAD, M. (2013), Manganese Ferroalloys Technology. In: GASIK, M. (ed.) Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology. Elsevier Ltd. All, Cap. 7, p.221-266.
- VALE. Vale adota no Brasil projeto pioneiro de reaproveitamento de minério de ferro. Disponível em: <http://saladeimprensa.vale.com/Paginas/Releases.aspx?r=Vale_adota_no_Brasil_projeto_pioneiro_de_reaproveitamento_de_minerio_de_ferro&s=Inovacao_e_Tecnologia&rID=844&sID=4>. Acesso em: jun. 2022.
- WU, Z. H.; HU, Y. J.; LEE, D. J.; MUJUMDAR, A. S.; LI, Z. Y. (2010), Dewatering and Drying in Mineral Processing Industry: Potential for Innovation, Drying Technology, Vol. 28, p.834-842.