



SECAGEM DE MINÉRIO DE FERRO PELLET FEED: INFLUÊNCIA DA UMIDADE INICIAL E DA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHOS DE PARTÍCULAS

AMARILIS S. SOUZA^{1*}, THIAGO F. PÁDUA¹, ALFREDO M. SARKIS², THIAGO C. SOUZA PINTO³, RODRIGO BÉTTEGA¹

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

²Instituto Tecnológico Vale

³Centro de Desenvolvimento Mineral

*e-mail: amarilis.sev@gmail.com

RESUMO – A secagem do minério de ferro *pellet feed* pode ser necessária caso esse material chegue nas plantas de pelotização com umidade acima da ideal para formação de pelotas. De acordo com a umidade inicial, o *pellet feed* pode apresentar diferentes formas (aglomerados ou lama). Alterações na forma desse material também ocorrem de acordo com as distribuições de tamanho das partículas. Neste trabalho, amostras de minério de ferro *pellet feed* foram secas em estufa a fim de analisar a influência de diferentes umidades iniciais, formas e tamanhos de partícula em sua secagem. As taxas máximas de secagem para o minério na forma de aglomerados (umidade inicial de 10%) foram de 10% a 15% maiores que aquelas apresentadas pelo material na forma de lama (umidade inicial de 13%). Por outro lado, diferentes composições de tamanho das partículas não tiveram efeito sobre o comportamento da secagem para as condições estudadas. Assim, os resultados indicam em que medida a forma, a umidade inicial e a distribuição de tamanhos de partículas do minério de ferro influenciaram na eficiência de seu processo de secagem.

INTRODUÇÃO

No processo de produção do ferro metálico, um dos componentes da alimentação dos altos-fornos é a pelota de minério de ferro. Essa pelota é produzida a partir dos finos de minério (*pellet feed*), que são misturados com ligantes e água em discos ou tambores até formarem esferas. A umidade do *pellet feed* antes de ser alimentado aos tambores é importante para a formação de pelotas de boa qualidade, devendo estar em torno de 8,5% (Meyer, 1980). Quando o minério chega na planta de pelotização com umidade maior que a ideal, pode ocorrer a interrupção da produção, o que provoca substanciais prejuízos financeiros. Portanto, estudos que analisem a redução da umidade do minério de ferro são importantes para a indústria mineradora.

O minério de ferro apresenta diferentes formatos de acordo com a sua umidade inicial.

Para umidades em torno de 10%, pode estar na forma de aglomerado, no qual as partículas facilmente se agregam ao serem pressionadas. Já para umidades maiores, pode se apresentar como uma lama ou pasta. O valor da umidade para o qual ocorre essa mudança na forma depende da granulometria, da área superficial e da composição mineralógica do *pellet feed* (Meyer, 1980; Van Der Meer, 2015).

Neste trabalho foi analisada a influência da umidade inicial, da forma e da distribuição de tamanhos de partículas do minério de ferro *pellet feed* em sua cinética de secagem.

MATERIAL E MÉTODO

Preparação da amostra

Amostras de minério de ferro (65,3% Fe; 0,74% SiO₂; 1,1% Al₂O₃) foram fornecidas pelo Instituto Tecnológico Vale (ITV) e peneiradas para o diâmetro de partícula correspondente ao *pellet feed* ($d_p < 500 \mu\text{m}$).

Para umidificar o minério, água destilada foi adicionada a porções de 200 g de minério seco até atingir a umidade nominal desejada. O material foi posto em sacos plásticos fechados, homogeneizado e mantido a temperatura ambiente.

Influência da umidade inicial

O minério de ferro foi umidificado a duas diferentes umidades: 10% (base úmida, BU; 0,11 base seca, BS) para corresponder à forma de aglomerados e 13% (BU; 0,15 BS) para apresentar forma de lama (Figura 1). Antes do início da secagem, as amostras com umidade inicial de 10% foram pressionadas contra uma tela para padronizar o tamanho dos aglomerados formados para um $d_p < 6$ mm.

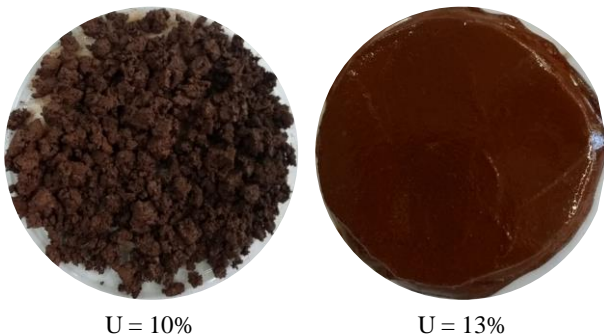


Figura 1: Fotografias do minério de ferro *pellet feed* a diferentes umidades iniciais.

As secagens foram feitas em estufa com convecção forçada e renovação de ar (Tecnal, TE-349/1). Cerca de 50 g do material úmido foram distribuídas uniformemente ocupando uma espessura de cerca de 6 mm sobre uma placa de Petri com 9,0 cm de diâmetro, que foi suspensa em uma corrente cuja extremidade foi conectada a uma balança (Ohaus, PA214) para aquisição automática da massa da amostra com o tempo. A massa era aferida a cada 0,09 s e registrada em um computador acoplado à balança (Ohaus – SPDC Data Collection V2.03).

Foram avaliadas três temperaturas do ar de secagem: 95, 105 e 115 °C. A velocidade do ar foi medida por meio de um anemômetro de fio quente (AKSO-AK833), sendo de aproximadamente 0,7 m/s. O procedimento de abertura de porta e inserção da amostra reduziu a temperatura da estufa em cerca de 4 °C no início da secagem, sendo que o valor da

temperatura de ajuste foi atingido novamente após cerca de 10 min. Após a secagem, as amostras foram levadas a uma estufa a 105 °C por 24 h para aferir a massa seca. Cada ensaio foi feito em triplicata.

A comparação entre a secagem das amostras a diferentes umidades iniciais se baseou nas curvas de cinética de secagem e no tempo necessário para a amostra atingir 0,5% de umidade. Foram comparadas as curvas do adimensional de umidade em base úmida (Equação 1) com o tempo, bem como as taxas de secagem, calculadas com base em um intervalo de tempo de 86 s entre cada dado.

$$X^*(t) = \frac{\bar{X}_t - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \quad (1)$$

Sendo \bar{X}_t , X_i e X_{eq} as umidades em BU no tempo t , inicial e no equilíbrio dinâmico, respectivamente.

Influência do tamanho das partículas

Dadas as alterações observadas na forma de acordo com as distribuições de tamanho das partículas, foi feito um teste preliminar a fim de verificar a diferença entre secar o minério de ferro IOCJ que contenha somente as partículas com $d_p < 106$ μm (lama) e secar o minério com partículas mais grosseiras, com diâmetros entre 106 μm e 500 μm (“areia molhada”), cuja aparência é ilustrada na Figura 2.



Aumento da quantidade de partículas com $d_p < 106$ μm

Figura 2: Fotografias do minério de ferro *pellet feed* umidificado a 13%: aumento gradual da aparência de lama conforme mais partículas com $d_p < 106$ μm são adicionadas à amostra.

Nesse sentido, foram preparadas amostras com as composições que constam na Tabela 1. Para esses ensaios, as amostras não

foram pressionadas contra uma tela, mas somente dispostas sobre uma placa de Petri. A umidade nominal de cada uma foi 13%, sendo utilizados 20 g de amostra para cada secagem em estufa. As curvas de adimensional de umidade em base seca (Equação 1) e taxa de

secagem para a temperatura do ar de 60 °C foram comparadas a fim de verificar a influência da forma e distribuição de tamanhos de partículas na secagem do minério de ferro.

Tabela 1: Composições das amostras para teste de secagem do IO CJ hidratado.

Tamanhos de partícula	Composição da amostra				
	1	2	3	4	5
106 μm < d_p < 500 μm	100%	75%	50%	25%	0%
d_p < 106 μm	0%	25%	50%	75%	100%

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Influência da umidade inicial

As curvas do adimensional de umidade e da taxa de secagem para diferentes umidades iniciais (10% - símbolos sem preenchimento; 13% - símbolos com preenchimento) e temperaturas do ar são apresentadas na Figura 3. Pode-se observar na Figura 3a) menores tempos de secagem para as condições em que foi utilizada uma menor umidade inicial e maiores temperaturas do ar, visto que para esses casos há uma menor massa de água para ser evaporada, bem como um aumento na transferência de energia que aquece o sólido, é consumida como calor latente e vaporiza a umidade.

Nas curvas de taxa de secagem (Figura 3b), foi possível distinguir os períodos de aquecimento, secagem a taxa constante e secagem a taxa decrescente apresentados pelo material. Para as amostras com 13% de umidade nominal foi observado um período prolongado de secagem a taxa constante, em que se observa a umidade crítica na faixa de 4 a 5% para as condições avaliadas. Tal comportamento está relacionado à própria característica não-higroscópica do material, para o qual a quantidade de água ligada é desprezível (Mujumdar, 2015). Valores de umidade crítica na mesma faixa foram observados por Souza Pinto et al. (2020) para diferentes amostras de minério de ferro.

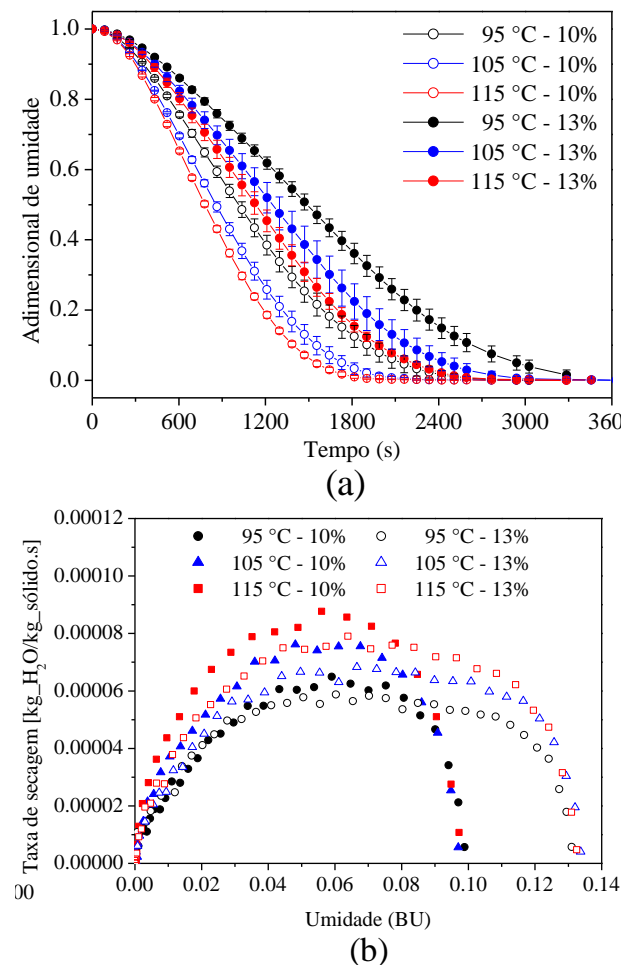


Figura 3: Curvas de cinética de secagem do minério de ferro: (a) Adimensional de umidade, com barras de erro correspondentes ao desvio padrão dos dados experimentais entre cada réplica; (b) Taxa de secagem para diferentes temperaturas e umidades iniciais: dados de uma única réplica.

Para o minério de ferro com 10% de umidade nominal, o período de secagem à taxa constante foi ficando menos distinguível à medida que a temperatura do ar de secagem

aumentou. Para a temperatura de 115 °C, os dados tiveram comportamento aproximadamente parabólico, indicando uma possível apresentação do período de taxa decrescente imediatamente após o período de aquecimento da amostra. Isso pode ser explicado pela alta temperatura e baixa velocidade do ar (comparado a um processo de fluidização, por exemplo), que resultaram em aquecimento lento da amostra até atingir uma umidade de aproximadamente 5%, valor próximo à umidade crítica observada para essas condições. Para as duas menores temperaturas, foi possível observar uma faixa (entre as umidades de 5 e 7%) na qual se identifica o período de taxa constante.

O aumento da temperatura de 95 °C para 115 °C reduziu em cerca de 28% e 25% o tempo

para a amostra atingir uma umidade de 0,5% considerando as umidades iniciais de 10% e 13%, respectivamente (Tabela 2). Para a temperatura de 115 °C, o tempo de secagem das amostras com 13% de umidade inicial foi cerca de 1,5x maior que o das amostras com 10% de umidade inicial. Comparando o valor médio das taxas de secagem máximas para diferentes umidades iniciais e temperaturas (Tabela 2), foi observado que para uma umidade inicial de 10% BU as taxas foram de 10% a 15% maiores. Como o material nessa forma apresentava poros entre os aglomerados e uma área de contato com o ar de secagem possivelmente mais elevada, tal fator pode ter favorecido a transferência de calor e massa entre as fases, tendo a secagem ocorrido a uma maior taxa.

Tabela 2: Taxas de secagem máximas (kg_água/kg_sólido.s) e tempo de secagem obtidos para diferentes umidades iniciais e temperaturas do ar de secagem.

Umidade inicial = 10%			Umidade inicial = 13%		
Temperatura (°C)	Taxa de secagem máxima† ($\cdot 10^{-5}, s^{-1}$)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Taxa de secagem máxima† ($\cdot 10^{-5}, s^{-1}$)	Tempo (s)
95	6,43±0,30	2160	95	5,57±0,28	3025
105	7,80±0,37	1728	105	7,10±0,54	2508
115	8,72±0,14	1555	115	7,95±0,06	2270

† São apresentados os valores médios das taxas de secagem máxima e o desvio padrão para a triplicata.

Influência do tamanho das partículas na secagem

Mesmo alterando a distribuição de tamanhos das partículas na secagem, observa-se que as curvas de cinética de secagem e taxa de secagem (Figura 4) foram muito próximas. Isso está relacionado à fraca afinidade do minério de ferro com a água. Considerando que partículas de menor tamanho podem apresentar uma maior compactação e assim ocorrer um aumento nas forças de interação devido ao aumento da área superficial das partículas, seria possível que houvesse maior resistência ao transporte de água do interior do sólido até a sua superfície. No entanto, tal comportamento não foi observado nos resultados, o que reforça que a resistência externa a transferência de massa controlou a maior parte do processo de secagem para essas condições. Souza Pinto et al. (2020) apresentaram uma micrografia de um aglomerado de *pellet feed* seco, a qual indicou

a formação de canais internos durante a secagem. Foi observado que as partículas se arranjaram para formar capilares que facilitaram o transporte de água do interior para o exterior da amostra, o que também pode contribuir para que a cinética de secagem do material tenha uma fraca dependência em relação ao tamanho das partículas presentes.

Assim, diferentes composições de tamanho das partículas não tiveram efeito sobre o comportamento da secagem para as condições estudadas. Tal resultado indica que tanto o transporte de água da superfície da amostra para o ar (externo), quanto o transporte de água do interior para o exterior da amostra (interno) não foram dependentes do tamanho das partículas.

Quanto à taxa, observou-se o prolongado período de secagem a taxa constante com umidade crítica em torno de 4%, o que indicou pouca resistência interna ao transporte de massa. O efeito de taxa decrescente observado ocorreu pela porosidade criada pela água retida nos interstícios do

contato partícula-partícula, já que a porosidade do conjunto de partículas úmidas dispostas em camada pode afetar o processo.

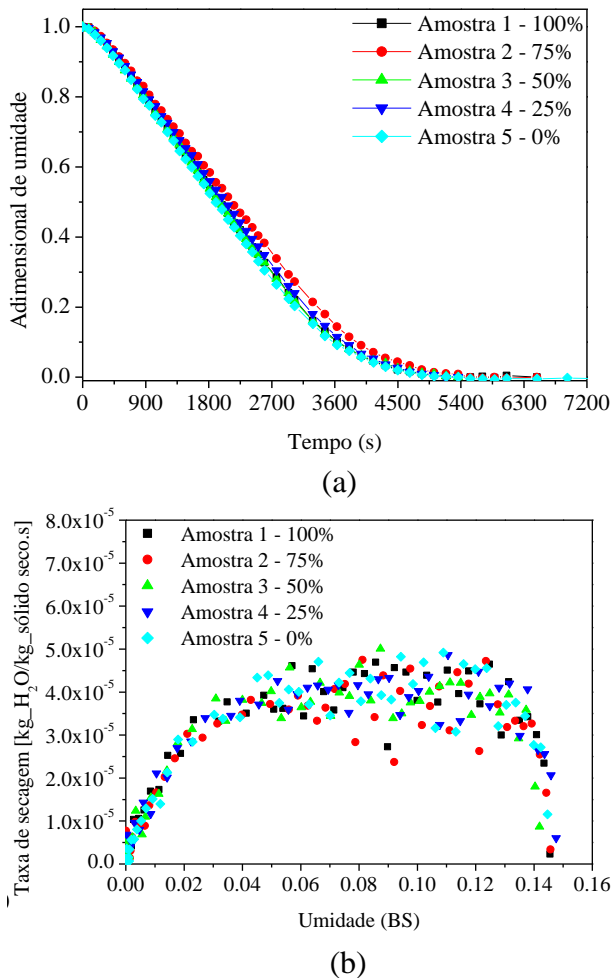


Figura 4: Curvas de cinética de secagem para as amostras do minério de ferro *pellet feed* (a) Adimensional de umidade pelo tempo e (b) taxa de secagem [kg_{água}/kg_{sólido seco}.s].

CONCLUSÃO

Foi investigada a cinética de secagem de minério de ferro *pellet feed* para umidades iniciais de 10% (aglomerados) e de 13% (lama). Com o aumento da temperatura de 95 para 115 °C, foi observada uma redução de 25 a 28% no tempo de secagem. As taxas de secagem máximas do minério inicialmente na forma de aglomerado (10% BU) foram de 10 a 15% maiores que aquelas apresentadas pelo minério com forma inicial de lama (13% BU). Os resultados indicam em que medida a forma e a umidade iniciais do minério de ferro influenciaram na eficiência de sua secagem. Por sua vez, diferentes composições de tamanho das partículas não tiveram efeito sobre o

comportamento da secagem para as condições analisadas. Isso indica que a segregação das partículas do minério e eventuais amostragens com partículas em sua maioria mais grosseiras ou mais finas possivelmente terão pouca influência sobre o comportamento da secagem, considerando a faixa analisada.

NOMENCLATURA

d_p Diâmetro da partícula [μm]
 X_{eq} Umidade de equilíbrio dinâmico [kg_{água}/kg_{sólido seco}]
 X_i Umidade inicial [kg_{água}/kg_{sólido seco}]
 \bar{X}_t Umidade média no tempo t [kg_{água}/kg_{sólido seco}]
 X^* Adimensional de umidade

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem o CNPq [142102/2019-9], o Instituto Tecnológico Vale (ITV) e a Vale S.A. pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- MEYER, K. Pelletizing of Iron Ores. (1980) Heidelberg: Springer-Verlag.
- MUJUMDAR, A. S. Chapter 42: Drying in Mineral Processing. (2015) In Handbook of Industrial Drying; Mujumdar, A. S., Boca Raton: CRC Press, p. 861–866.
- SASS, A. Simulation of heat-transfer phenomena in a rotary kiln. (1967) Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development, v. 6, n° 4, p. 532-535.
- 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.
- VAN DER MEER, F. P., Pellet Feed Grinding by HPGR. (2015) Miner. Eng., v. 73, p. 21-30.