INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO NA DESUMIDIFICAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DO TIPO *SINTER* E *PELLET FEED*.

INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS ON THE DEHUMIDIFICATION OF SINTER AND PELLET FEED IRON ORE.

Nickolas Augusto Cavalcante Silva, Luiz Felipe de Morais da Costa Barros, Gabriel Moni Machado, Ian Pedrosa Miranda, Vitor da Silva Rosa, Nelize Maria de Almeida Coêlho.

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Química
E-mail para contato: nickolasaugusto98@gmail.com

RESUMO – *O estudo analisou a influência da temperatura e velocidade do ar de secagem e da espessura do leito na desumidificação de minério de ferro do tipo sinter e pellet feed. Os ensaios foram conduzidos em um túnel de vento sob diversas combinações de condições operacionais. Os resultados indicaram que a espessura do leito foi o parâmetro de maior impacto, enquanto a temperatura e a velocidade do ar se apresentaram como efeitos secundários. Constatou-se que, até cerca de 8 %, o mecanismo de secagem ocorreu à taxa constante, sendo, portanto, fortemente dependente da taxa de migração interna da umidade. Não houve diferença significativa no comportamento da secagem à taxa constante para os dois tipos de minério, todavia, à taxa decrescente, o pellet feed demonstrou uma difusão interna mais lenta.*

Palavras-chave: Secagem; Minério de ferro; *Sinter feed*; *Pellet feed*, Transferência de calor e massa.

ABSTRACT – *The study analyzed the influence of drying air temperature, air velocity, and bed thickness on the dehumidification of sinter and pellet feed iron ore. The experiments were conducted in a wind tunnel under various combinations of operating conditions. The results indicated that bed thickness was the parameter with the greatest impact, while air temperature and velocity had secondary effects. It was found that, up to approximately 8% moisture, the drying mechanism occurred under a constant rate, being strongly dependent on the internal moisture migration rate. No significant difference was observed in the constant rate drying period between the two types of ore; however, during the falling rate period, the pellet feed iron ore exhibited slower internal diffusion.*

Keywords**:** *Drying; Iron ore; Sinter feed; Pellet feed; Heat and mass transfer.*

1. INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa posição de destaque entre os maiores produtores e exportadores de minério de ferro do mundo, movimentando, conforme a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), cerca de 330,1 milhões de toneladas em 2013, das quais aproximadamente 50 % foram destinadas ao mercado chinês. O escoamento desse produto ocorre, predominantemente, por meio de instalações portuárias especializadas pertencentes às grandes mineradoras, com destaque para a Vale S.A., responsável por 64,4 % das exportações realizadas a partir dos Terminais de Uso Privado (TUP) de Ponta da Madeira e CVRD Tubarão, seguida pelo Porto de Itaguaí (15,7 %) e pelo TUP MBR (12,3 %). Para manter a competitividade e a sustentabilidade econômica do setor, as mineradoras buscam reduzir o custo unitário do frete por tonelada transportada, investindo em embarcações mais eficientes, tanto em velocidade quanto em capacidade de carga, promovendo, assim, ganhos logísticos e economia de escala (ANTAQ, 2014).

Entretanto, a adoção de embarcações de grande porte enfrenta restrições estruturais em determinados portos brasileiros, o que desloca a atenção para outro aspecto operacional relevante: o elevado teor de umidade do minério de ferro, geralmente em torno de 10 %. Essa característica representa um desafio significativo, pois interfere diretamente nas propriedades de manuseio, transporte e segurança do produto. Em condições portuárias, o minério é usualmente estocado a céu aberto em pilhas com até 20 metros de altura, estando sujeito à ação direta das chuvas e à alta umidade relativa do ar das regiões litorâneas, fatores que afetam os fenômenos de transferência de calor e massa e, consequentemente, o processo natural de evaporação da água presente no material (MORAES JR., 1995; FOUST et al., 1982; GEANKOPLIS, 2003).

O transporte de minério contendo elevados teores de umidade implica não apenas em perda de capacidade útil de carga, devido ao volume ocupado por água — substância sem valor comercial —, mas também em riscos operacionais durante a navegação. A presença de umidade pode causar instabilidades mecânicas e oscilações na embarcação em decorrência da movimentação de massa fluida, podendo, em situações extremas, comprometer a segurança do transporte marítimo (ANTAQ, 2014; MCCABE, SMITH e HARRIOTT, 2005). Além disso, o excesso de água no minério dificulta o controle dos parâmetros de secagem e armazenamento,

interferindo nas etapas subsequentes do beneficiamento e no consumo energético dos processos industriais (MUJUMDAR, 2007).

Nesse contexto, a compreensão dos fenômenos de secagem e desumidificação se torna fundamental. Segundo Geankoplis (2003) e McCabe, Smith e Harriott (2005), a transferência simultânea de calor e massa em sólidos úmidos envolve regimes distintos de secagem, variando conforme a estrutura do leito, a umidade do ar e as condições de escoamento. Em materiais granulares como o minério de ferro, a remoção de umidade ocorre predominantemente por mecanismos convectivos e capilares (FOUST et al., 1982; MORAES JR., 1995). Estudos recentes utilizando modelagem numérica e simulações CFD (*Computational Fluid Dynamics*) reforçam a importância da análise termo-hidrodinâmica desses processos, especialmente no comportamento de partículas individuais e leitos porosos sob fluxo de ar quente (TSUKERMAN; DUCHESNE; HODOUIN, 2007; LJUNG et al., 2011; LJUNG; LUNDSTRÖM; TANO, 2011).

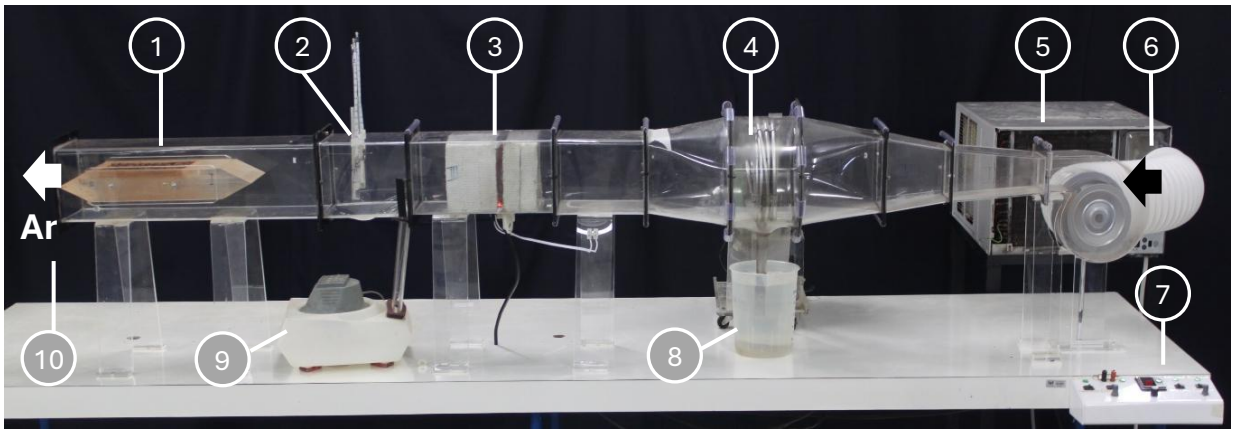
O presente trabalho teve como objetivo avaliar experimentalmente os fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos no processo de remoção de umidade de amostras de minério de ferro do tipo *sinter e pellet feed*. O estudo buscou analisar a influência das variáveis altura do leito, velocidade e temperatura do ar de secagem sobre a taxa de desumidificação do minério, a partir de uma umidade inicial pré-estabelecida.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A unidade experimental utilizada neste estudo (Figura 1) está instalada no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília (UNISANTA).

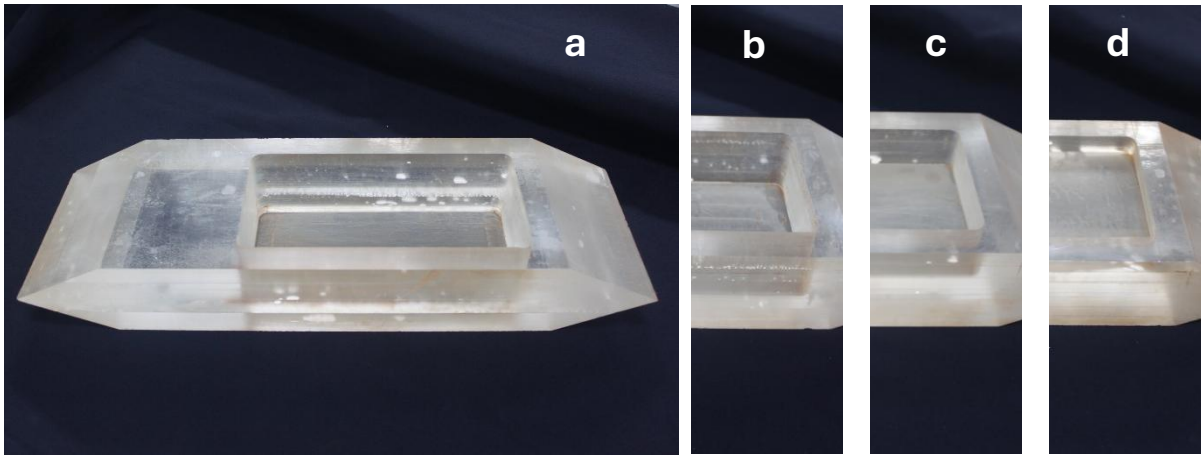
Conforme apresentado na Figura 1, a unidade experimental é composta de um túnel de seção quadrada em acrílico transparente. Um ventilador do tipo Sirocco promove a sucção de ar para o túnel, possibilitando que este passe por um sistema de redução de umidade e por outro de aquecimento elétrico. A jusante do duto, há um suporte lateral para acomodar centralizadamente as bandejas contendo as amostras de minério. Um conjunto de 2 termômetros, para leitura das temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido, fornece os dados necessários para a determinação da umidade relativa e da umidade absoluta do ar através de carta psicrométrica apropriada.

Figura 1: Vista frontal da unidade para estudo da desumidificação de sólidos na condição estática. 1) Bandeja com amostra; 2) Medidores de Temperatura de bulbo seco e bulbo úmido do ar; 3) Aquecedor; 4) Desumidificador de ar; 5) Ar-condicionado; 6) Entrada de ar (duto de sucção); 7) Painel de controle; 8) Duto para retirada de água; 9) Umidificador; 10) saída de ar.



As bandejas para acomodar o minério foram projetadas considerando a maior partícula do material encontrado na amostra de *sinter feed*, que foi de, aproximadamente, 15 mm. Desta forma, optou-se por bandejas de 15, 30, 45 e 60 mm de profundidade. As extremidades na forma V foram empregadas para fins aerodinâmicos (Figura 2).

Figura 2: Bandejas utilizadas no túnel de vento para o processo de desumidificação de minério de ferro. Espessuras: a) 60 mm; b) 45 mm; c) 30 mm; d) 15 mm.



O minério de ferro utilizado para os ensaios foi previamente selecionado e condicionado em uma estufa à 120 °C por pelo menos 24 h antes dos testes para assegurar que estivesse livre de umidade. Para realização dos ensaios, parte do minério foi retirado e pesado, sendo então resfriado naturalmente até temperatura ambiente. A umidade inicial adotada nos ensaios foi de 10 % (base úmida) e foi provocada, artificialmente, a partir da adição de determinada

quantidade de água destilada no minério até completa homogeneização da mistura, visando minimizar a ocorrência de água livre no recipiente. A Equação 1 apresenta o cálculo utilizado na preparação das amostras.

$$m_{água} = \frac{U_d}{(100 - U_d)} \cdot m_{minério} \quad (1)$$

Em que:

$m_{água}$ é a massa de água a ser adicionada na amostra (g)
$m_{minério}$ é a massa de minério (g)
U_d é a umidade desejada no minério (%)

Utilizando-se de um distribuidor em acrílico, o minério úmido foi completamente espalhado sobre a bandeja, sendo o material excedente retirado através de um raspador. Antes de iniciar o ensaio, as bordas da bandeja foram completamente limpas e a temperatura e a velocidade do ar foram ajustadas através de leituras de bulbo seco e bulbo úmido e da utilização de um anemômetro. No caso específico dos ensaios com *pellet feed*, o leito de minério foi recoberto com uma fina gaze para mitigar a perda de material por arraste.

Uma vez preparada a bandeja, obteve-se a massa inicial do conjunto bandeja-minério numa balança Gehata BK5000 com precisão de 0,01 g. Quando da inserção da bandeja no túnel de secagem, acionou-se o cronômetro e deu-se início ao processo. Os intervalos de tempo para coleta de amostra foram estipulados em 5 minutos ou mais, tendo como base a taxa de variação do decaimento da massa. A cada medição de massa, realizou-se, também, a leitura das temperaturas com a precaução de manter o par bulbo seco/bulbo úmido dentro da faixa de umidade do ar.

A influência da velocidade e temperatura do ar de secagem e da profundidade do leito de material na taxa de secagem do minério foi estudada a partir de um planejamento fatorial completo para cada tipo de minério, conforme descrito na Tabela 1. O objetivo foi avaliar quais os fatores de maior relevância na taxa de desumidificação do material, bem como identificar o teor de umidade crítica. Os critérios de escolha dos níveis para temperatura e velocidade do ar tomaram como base as limitações do aparato. Cada ensaio foi realizado pelo menos com 3 repetições, totalizando 32 ensaios genuínos para cada tipo de minério e um total de 192 corridas.

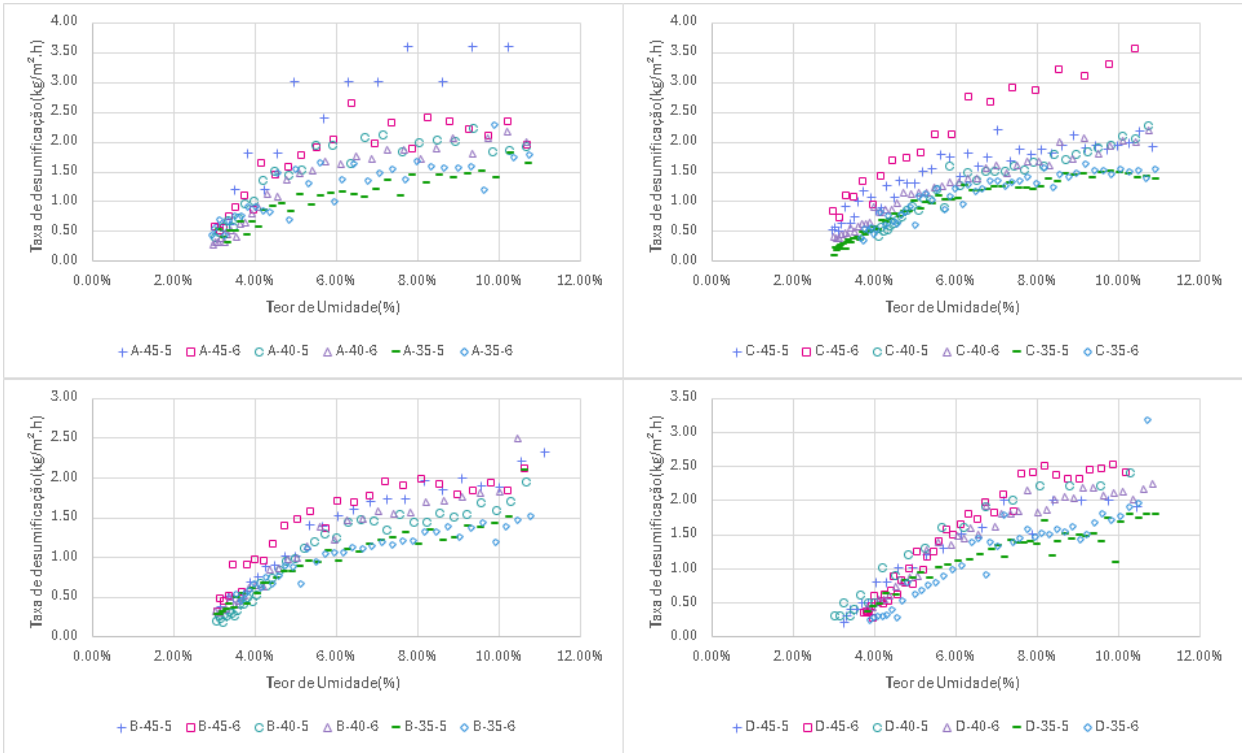
Tabela 1: Planejamento Experimental do presente estudo.

Fatores	Níveis			
Temperatura do ar (°C)	35	40	45	
Velocidade do ar (m/s)	5	6		
Profundidade do leito (mm)	A (15)	B (30)	C (45)	D (60)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os dados coletados durante a pesquisa foram obtidas as curvas de secagem do minério de ferro do tipo *Sinter Feed* (Figura 3) e do tipo *Pellet Feed* (Figura 4).

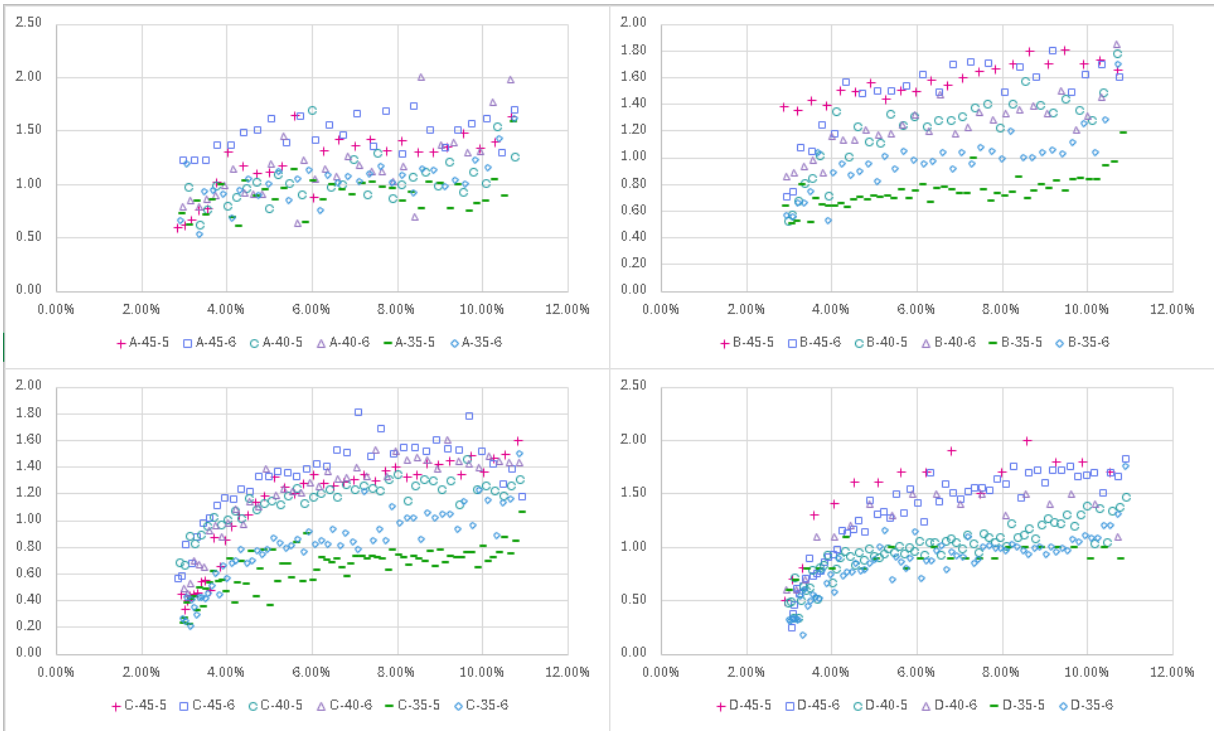
Figura 3: Resultados Experimentais da desumidificação de sinter feed de minério de ferro. As legendas A, B, C e D representam a profundidade das bandejas, os números 35, 40 e 45 a temperatura do ar de secagem e o 5 e 6 a velocidade do ar de secagem.



A partir do exposto na Figura 3, foi observado que o teor de umidade crítico se apresentou quando o minério atingiu aproximadamente 8 %. Portanto, há indícios de que entre 10 e 8 % de umidade a evaporação superficial foi predominante, ou seja, que a secagem ocorreu

independentemente das condições internas do material, semelhante ao processo convencional de evaporação superficial de uma massa de líquido livre. A vista disso, a água retirada da superfície foi, nessa fase, continuamente substituída pelo líquido que migrou por capilaridade do interior do material, mantendo constante a taxa de remoção de umidade. Após o ponto crítico, a taxa de desumidificação diminuiu gradualmente, evidenciando uma limitação por difusão interna da umidade dentro das partículas e pelos gradientes de temperatura no interior do leito. Também foi possível observar que os ensaios com temperaturas mais elevadas (representados pelos símbolos "+" e "□") geralmente exibiram taxas de secagem superiores em toda faixa de umidade, demonstrando que o gradiente térmico entre o ar e o material a ser seco intensificou o fluxo de calor sensível e, consequentemente, o transporte de massa.

Figura 4: Resultados Experimentais da desumidificação de pellet feed de minério de ferro. As legendas A, B, C e D representam a profundidade das bandejas, os números 35, 40 e 45 a temperatura do ar de secagem e o 5 e 6 a velocidade do ar de secagem.



A diferença entre as temperaturas foi marcante, sobretudo na fase inicial de taxa constante, em que o ar quente promove rápida remoção da água superficial. Já do ponto de vista da velocidade do ar, esta promoveu um aumento modesto da taxa de secagem quando o sistema

foi operado com maior velocidade. Tal fato pode indicar que a resistência externa ao transporte de massa foi pequena em relação à resistência difusiva interna imposta principalmente pela espessura do leito.

Para os ensaios com *pellet feed* observou-se, novamente, que a umidade crítica se manifestou próxima de 8 % (Figura 4). Por outro lado, observou-se que, neste caso, a inclinação da reta que caracteriza a fase à taxa decrescente foi mais suave em relação ao *sinter feed*. Tal fato indica que a perda de água livre ocorreu rapidamente, mas a difusão interna foi mais lenta devido à compactação e menor permeabilidade do leito. Também foi observado maior dispersão dos pontos experimentais para o *pellet feed* o que pode ser associado à menor granulometria das partículas que as confere maior mobilidade e uma tendência à formação de micro aglomerados que afetam a homogeneidade da camada durante o ensaio.

5. CONCLUSÃO

A partir do exposto, pôde se concluir que a desumidificação de amostras de minério de ferro dos tipos *sinter feed* e *pellet feed* é fortemente influenciada pela espessura do leito, parâmetro que se mostrou o principal fator limitante da taxa de secagem. A temperatura do ar exerceu efeito secundário, acelerando a remoção de umidade superficial, enquanto a velocidade do ar apresentou influência marginal, indicando que o processo ocorreu predominantemente sob controle difusivo interno. Verificou-se que a umidade crítica se apresentou por volta de 8 %, ponto a partir do qual a taxa de secagem se tornou decrescente devido à resistência interna à transferência de massa. Apesar das diferenças granulométricas entre os dois materiais, ambos apresentaram comportamento semelhante, com leve dispersão maior no *pellet feed* em função de sua menor permeabilidade.

6. REFERÊNCIAS

ANTAQ. Boletim Anual de Movimentação de Cargas - 2013. Análise da Movimentação de Cargas nos Portos Organizados e Terminais de Uso Privado. Brasília, 2014.

FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C. W., MAUS, L., ANDERSEN, L. B. Princípios de Operações Unitárias. Rio de Janeiro, LTC, 1982. 670p.

GEANKOPLIS, C. J. Transport Processes and Unit Operations. 4a ed. New Jersey, PTR Prentice Hall, 2003. 1025p.

LJUNG, A-L., A.-L. LUNDSTRÖM, T. S., MARJAVAARA, B. D., TANO, K. Convective drying of an individual iron ore pellet – Analysis with CFD. International Journal of Heat and Mass Transfer. Volume 54, pag 3882-3290, 2011.

LJUNG, A-L., A.-L. LUNDSTRÖM, T. S., TANO, K. Simulation of convective drying of a cylindrical iron ore pellet. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow. Volume 21, Issue 6, pag 703-716, 2011.

MCCABE, W. L., SMITH, J. C., HARRIOTT, P. Unit Operations of Chemical Engineering. 7a ed. International Edition printed in Singapore, McGraw-Hill, 2005. 1140p.

MORAES Jr, D. Fundamentos de Psicrometria e Secagem. São Carlos, Gráfica da Universidade de São Carlos (UFSCar), 1995.

MUJUMDAR, A. S. Handbook of Industrial Drying. 3a ed. New York, CRC Press, 2007. 1312p.

TSUKERMAN, T., DUCHESNE, C., HODOUIN, D. On the drying rates of individual iron oxide pellets. International Journal of Mineral Processing, Volume 83, pag 99-115, 2007.