



PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SECADOR CONVECTIVO DE MINÉRIO DE FERRO EM ESCALA DE LABORATÓRIO

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 – Secadores de minério de ferro em escala de laboratório são essenciais para os avanços na área de pesquisa e desenvolvimento da indústria mineral. O objetivo deste trabalho foi realizar o projeto, a construção e a instrumentação de um secador convectivo de minério de ferro, cuja operação compreenda altas temperaturas (≥ 100 °C) e velocidades do ar (≥ 5 m/s). Orientações detalhadas para a construção, instrumentação e operação do equipamento foram apresentadas. O teste experimental da performance do equipamento envolveu três experimentos de cinética de secagem a diferentes condições do ar de secagem: 100 °C e 5 m/s; 160 °C e 10 m/s; 100 °C e 18 m/s. Para a secagem completa de uma amostra de 250 g de minério, foram necessários 120 s para a condição a 160 °C e 10 m/s. O equipamento construído pode operar em ampla faixa de condições do ar de secagem, bem como possibilitou a obtenção de curvas de cinéticas de secagem de finos de minério de ferro. A descrição detalhada dos aspectos de construção desse equipamento pode contribuir para o desenvolvimento de secadores para materiais que apresentem comportamento ou necessidades operacionais similares.

INTRODUÇÃO

A presença de água no minério de ferro pode afetar diversas etapas de sua cadeia produtiva. Nos terminais portuários, antes do embarque, o minério de ferro deve atender o nível máximo de umidade para transporte seguro de materiais a granel em navios, denominado *Transportable Moisture Limit* (TML) (IMO, 2019). Como materiais com umidade acima do TML possuem risco de liquefazer e provocar o tombamento do navio, o seu carregamento não é permitido, o que pode ocasionar atrasos no embarque e substanciais prejuízos financeiros para a mineradora. Cerca de sete acidentes com navios carregando minério de ferro, possivelmente devido a problemas com umidade, já foram reportados entre 2007 e 2013 (MUNRO e MOHAJERANI, 2014). Assim sendo, a redução da umidade do

minério antes do seu embarque é essencial para o transporte seguro desse material.

A escolha do secador e das condições operacionais apropriadas para atender as demandas de redução de umidade na indústria mineral apresentam um grande desafio para esse setor. Os principais aspectos relacionados à secagem do minério de ferro devem levar em conta a alta escala de produção nas mineradoras. Em operações em linhas que podem variar de 600 a 20.000 toneladas de minério processado por hora, o ar de secagem deve transferir a energia necessária para aquecimento e evaporação da água, bem como ter uma vazão apropriada para a transferência de umidade da fase sólida para a fase ar. Como a vazão de sólido úmido é elevada, na indústria mineral é comum utilizar temperaturas maiores que 100°C aliadas a altas vazões de ar para atender a demanda do processo (GHOSHDASTIDAR et al., 2002;

NAMKUNG e CHO, 2004), tendo em vista a resistência do minério a condições mais severas do ar de secagem.

Em um trabalho de revisão sobre redução de umidade de minérios, WU et al. (2010) apontaram os potenciais de inovação para a indústria mineradora, forneceram uma visão geral dos processos e identificaram novas tecnologias de secagem. Concluíram que à medida que a demanda global por minerais aumenta, espera-se que novas tecnologias de secagem e desidratação surjam em um futuro próximo para acompanhar o ritmo de produção e a demanda da indústria mineral. No entanto, reportaram que a área de Pesquisa e Desenvolvimento em processamento mineral está em níveis baixos há mais de cinco décadas. Essa observação reforça a necessidade de avanços nas pesquisas nessa área. Dessa forma, ensaios em escala de laboratório para análise da cinética de secagem são necessários para conhecer o comportamento de secagem do minério de ferro e encontrar alternativas para a otimização dessa operação.

Os problemas para a implementação de secadores convectivos para os finos de minério de ferro em laboratórios de pesquisa se referem principalmente às condições operacionais desses secadores, bem como às características particulares do próprio minério de ferro. Quanto às questões operacionais, busca-se utilizar temperaturas e velocidades do ar de modo a reproduzir condições aproximadas àquelas usadas na indústria para o beneficiamento do minério. Portanto, são necessários equipamentos e materiais apropriados para essa faixa de operação. Quanto às características do minério de ferro, tem-se que sua densidade é elevada (em torno de 4 g/cm³), suas partículas podem formar aglomerados quando úmido (Figura 1) e inclusive vir a comportar-se como uma lama ou pasta a depender da umidade (SOUZA PINTO *et al.*, 2020). Outra questão importante é o arraste de material particulado fino que ocorre durante a secagem do minério de ferro, devido à quebra, aos choques ou ao seu desprendimento dos aglomerados úmidos. Tais fatores dificultam a sua utilização em secadores, por requererem versatilidade operacional.

Tendo em vista as particularidades na operação de um secador de minério de ferro, orientações sobre a construção de equipamentos de laboratório apropriados para a operação de secagem desse material podem contribuir para alavancar as pesquisas neste setor. Além disso, também podem auxiliar no desenvolvimento de equipamentos para materiais que apresentem comportamento ou necessidades operacionais similares.

O objetivo deste trabalho foi realizar o projeto, a construção e a instrumentação de um secador convectivo de minério de ferro cuja operação compreenda altas temperaturas (≥ 100 °C) e velocidades do ar (≥ 5 m/s). Os termos “alta temperatura” e “alta velocidade” utilizados neste trabalho, se referem a essas faixas. Orientações detalhadas para a construção e instrumentação do equipamento foram discutidas. Também foram apresentadas cinéticas de secagem do minério de ferro no equipamento construído para verificar sua operação.



Figura 1: Finos de minério de ferro (a) seco e (b) com umidade de 10%.

MATERIAIS E MÉTODOS

Aspectos de Projeto

Foi projetado um equipamento que contasse com partes básicas de um secador convectivo de minério de ferro em regime de batelada. Deveria incluir uma região de entrada de ar, uma de alimentação/coleta de sólidos e outra de coleta do particulado arrastado (Figura 2).

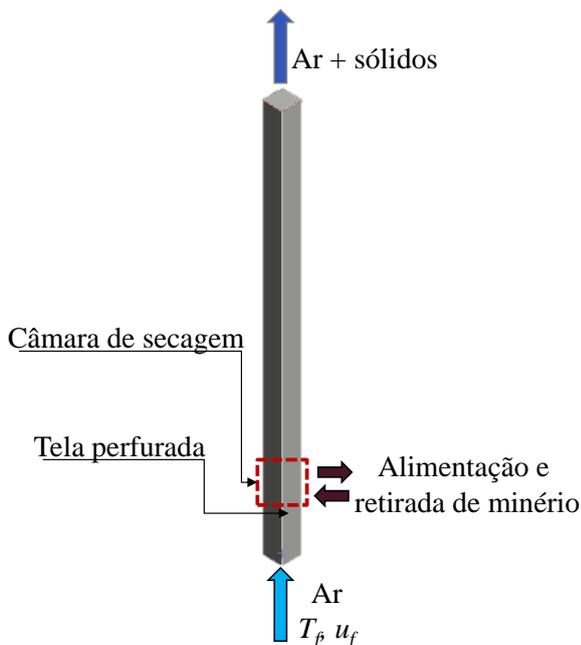


Figura 2: Esquema geral do projeto do equipamento de secagem de minério de ferro.

Os seguintes pontos de atenção foram apontados na concepção do projeto:

- O soprador e o sistema de aquecimento de ar precisam fornecer vazão e energia suficiente para atender as condições do ar de secagem. Optando-se pelo aquecimento por resistências elétricas, a amperagem máxima da rede elétrica disponível deve ser respeitada;
- Deve haver vedação adequada das flanges entre tubos, conexões e equipamentos, utilizando material resistente a alta temperatura, a fim de evitar vazamento de ar quente.
- A área transversal da câmara de secagem deve proporcionar uma adequada exposição do material ao ar de secagem, de modo a diminuir o efeito de parede. Por outro lado, uma área maior exigirá uma maior potência do soprador para que o ar de secagem atinja

velocidades mais elevadas na região. O princípio da parcimônia deve ser utilizado para definir essa dimensão;

- O equipamento deve permitir a alimentação e retirada das amostras secas em diferentes intervalos de tempo para obtenção da cinética de secagem pelo método gravimétrico.
- Por motivos de segurança, o procedimento de alimentação e coleta de amostras deve ser feito sem o escoamento do ar quente no interior do secador e durante o menor intervalo de tempo possível;
- Necessidade da instalação de um coletor de material particulado na saída da câmara principal de secagem (SOUZA *et al*, 2022);

Construção

A Figura 3 apresenta o esquema geral da unidade construída, composta por:

- soprador de 21 HP (Repicky),
- *by-pass* na saída do soprador com duas válvulas gaveta 4" para regulagem da vazão no sistema;
- placa de orifício para medição da vazão de ar, afixada entre tubos de aço com 4" de diâmetro;
- duas caixas de resistências com 7 resistências tubulares aletadas de 1 kW em cada, somando uma potência de 14 kW. Considerando a tensão da rede de 220 V, as resistências consomem cerca de 64 A. Conectores sindal foram utilizados para ligar os fios às resistências, para maior segurança;
- um sistema de *by-pass* para acionar e retirar rapidamente o ar da coluna de secagem, composto por uma válvula esfera diversora de fluxo, tipo L, com diâmetro de 2", passagem plena.
- câmara de secagem feita de uma tubulação de aço carbono de seção quadrada de lado 10 cm, que ascende por uma coluna vertical de cerca de 2 m de altura e termina em um ciclone Stairmand.
- O ciclone possuía caixa de aço carbono para coleta de material particulado em seu *underflow*. A caixa era acoplada ao ciclone por meio de uma borracha de vedação e um conjunto de grampos múltiplos. Um tubo extensivo de alumínio, resistente a temperaturas até 240 °C, foi acoplado ao

overflow para conduzir o ar até a saída do laboratório;

- Isolamento térmico das paredes da câmara de secagem com placas de silicato de cálcio com 2,7 cm de espessura.

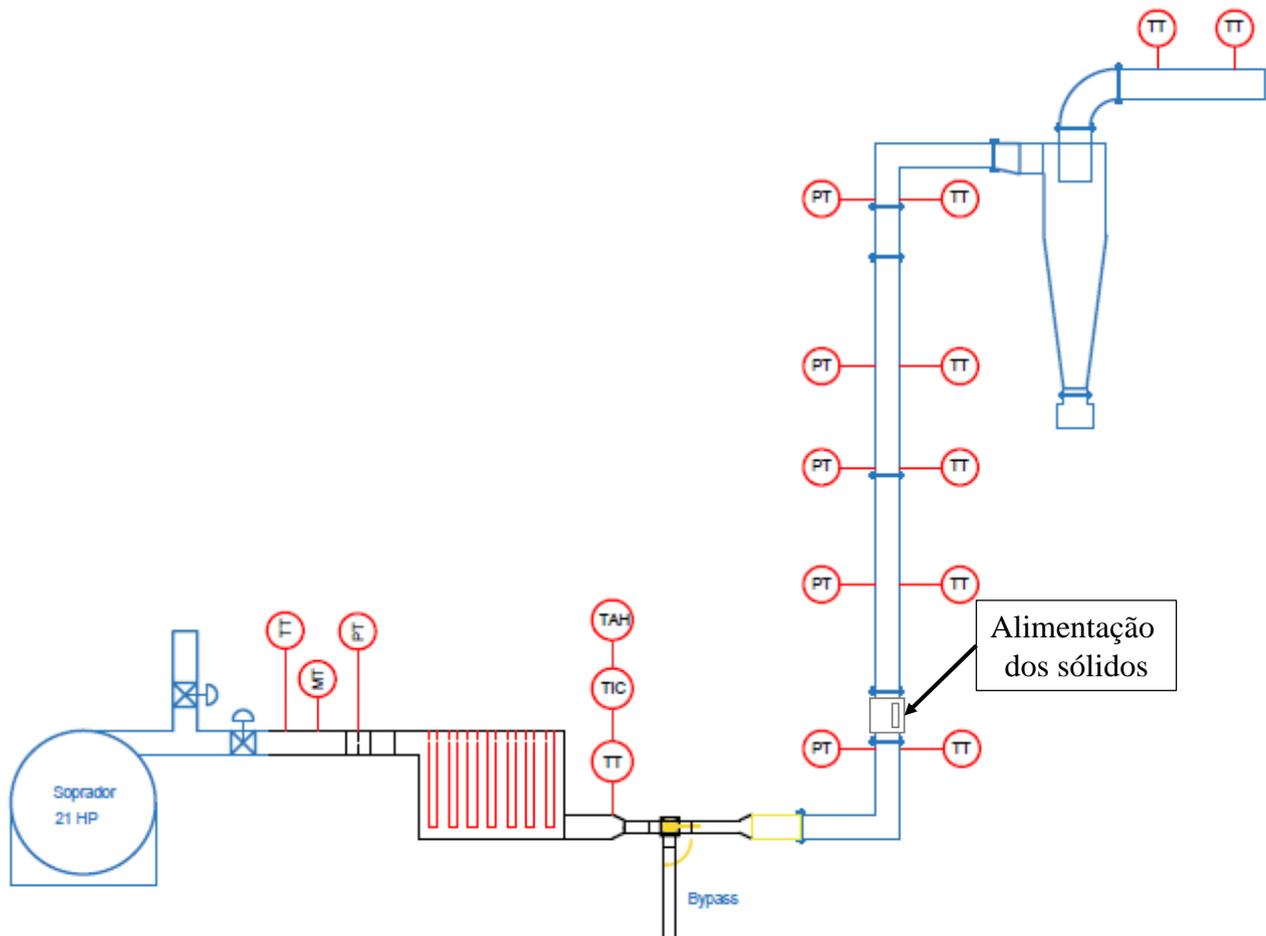


Figura 3: Desenho esquemático dos componentes do secador de minério de ferro construído.

- Isolamento térmico na tubulação de ar antes do leito, o isolamento foi feito com camadas de lã de vidro.
- Flanges de cada peça do equipamento foram vedadas por borrachas de silicone pré-moldadas resistentes a temperaturas até 260 °C (Terac) ou por junta líquida de vedação resistente a temperaturas de até 240 °C (Orbi Química).

A instrumentação do equipamento incluiu um chassi cDAQ-9174 CompactDAQ (National Instruments), com um módulo para 8 canais para termopares (NI-9212 MiniTC) e um módulo com 8 canais analógicos (-/+ 20 mA) 16 bit e 25 KS/s (NI9203).

Os sensores conectados ao chassi consistem em:

- transmissor de temperatura e umidade do ar RHT DW-DM (Novus) posicionado na saída de ar do soprador, antes da placa de orifício;
- transmissor de pressão diferencial RTD-420-DIF (Rücken), posicionado na placa de orifício e
- cinco transmissores de pressão (WIKA; modelo A-10) posicionados de forma equidistante ao longo da coluna de secagem.
- cinco termopares tipo T distribuídos de forma equidistante (de 0,5 em 0,5 m) ao longo da coluna de secagem, conforme indicado na Figura 3. As configurações dos termopares eram:
 - Encapsulado;
 - 3 mm de diâmetro da sonda;
 - 35 mm de comprimento da haste;
 - Pote liso em inox, com mola por fora do pote;

- 5 m de cabo flexível em teflon.

O controle da temperatura do ar foi feito por um controlador PID modelo FE-50RPN (Flyever) com um canal para leitura de temperatura (termoresistência PT-100), que apresentava um sistema de segurança para o desligamento da potência em caso de aquecimento acima de uma temperatura definida pelo usuário. Disjuntores no próprio controlador também protegiam o sistema em caso de sobrecarga. Os parâmetros de controle foram sintonizados diretamente no equipamento e os valores foram $P=3$; $I=300$ e $D=20$. Esses parâmetros permitiram a minimização do offset ($\pm 0,3^{\circ}\text{C}$). A sintonização do controlador foi feita no local conforme orientações de Seborg *et al* (2003).

A Figura 4 apresenta fotografias do equipamento construído.

Operação

O secador foi operado seguindo algumas etapas. Primeiramente, o soprador foi ligado e os sistemas de controle de temperatura e aquisição de dados em linha foram acionados. Após estabilização da vazão e da temperatura do ar nas condições desejadas, iniciaram-se os ensaios de cinética de secagem. Para tal, a válvula esfera foi acionada para redirecionar o ar quente da câmara de secagem para o *bypass* e possibilitar a inserção segura da amostra na câmara de secagem.

O sistema de inserção de sólidos no equipamento foi montado conforme a Figura 5. Foi feita uma abertura na lateral da parede do tubo para inserção de uma gaveta de aço inoxidável, contendo uma tela metálica acoplada em sua base. Após a alimentação da amostra na gaveta, esta era inserida no equipamento e sua extremidade era pressionada contra uma borracha para evitar a saída de ar quente. A fim de proporcionar uma vedação apropriada, a pressão da gaveta contra a borracha era realizada por meio de um grampo vertical (Figura 5), com abertura e fechamento tipo alavanca, que permitia travar e soltar a estrutura com maior rapidez. Após o procedimento de alimentação da amostra, a válvula esfera era novamente acionada para que o ar quente retornasse ao secador e o tempo de secagem fosse iniciado.



(a)

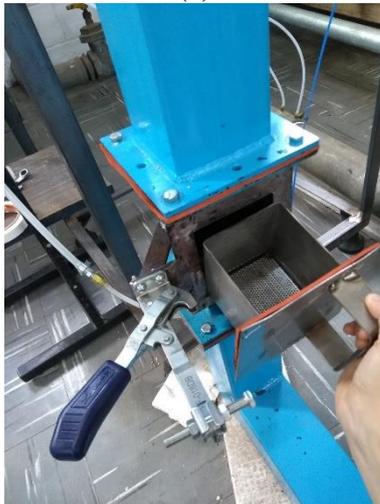


(b)

Figura 4: Fotografias do equipamento de secagem de minério de ferro, construído no Centro de Secagem de Pastas, Sementes e Suspensões, do DEQ/UFSCar.



(a)



(b)

Figura 5 - Procedimento de abertura e fechamento da câmara de coleta de amostras.

Durante a secagem, a porção da amostra arrastada pelo ar seguia para o ciclone e a outra parte da amostra ficava em contato direto com o ar alimentado, na região sobre a tela da gaveta. Ao finalizar o tempo de secagem estabelecido, a válvula esfera diversora de fluxo era novamente acionada para desviar o ar quente da coluna de secagem. Ressalta-se que este procedimento é muito importante para a segurança do operador, já que ar a altas velocidades e temperaturas é empregado no equipamento. Assim, a amostra depositada sobre a tela era recolhida pela gaveta e sua outra parte coletada no *underflow* do ciclone.

Antes de cada ensaio, o recipiente do *underflow* era envolvido com uma sacola plástica resistente a altas temperaturas (até 200 °C) a fim de auxiliar a coleta do material e evitar a perda de particulado fino durante a operação de desacoplamento do recipiente.

Teste experimental

O teste experimental envolveu três ensaios de cinética de secagem a diferentes condições de temperatura e velocidade do ar: 100 °C e 5 m/s; 160 °C e 10 m/s; 100 °C e 18 m/s.

Preparação da amostra: Amostras de finos de minério de ferro com $d_p < 500 \mu\text{m}$, fornecidas pelo Instituto Tecnológico Vale (ITV) foram utilizadas. As amostras de finos de minério de ferro foram umedificadas adicionando água destilada a porções de 2 kg de minério seco até atingir a umidade de 10% em base úmida. A homogeneização e mistura da amostra com a água foi feita manualmente. O material era distribuído em uma bandeja de vidro com dimensões 31x19 cm, coberto com plástico filme e deixado em geladeira a 4 °C por até 12 h antes dos ensaios.

Procedimento experimental: A câmara de secagem era carregada com uma massa de 250 g de material úmido por meio da “gaveta”, equivalente a uma camada fina de material de aproximadamente 1 cm de espessura. Ao final de cada intervalo de tempo de secagem, a amostra era retirada do equipamento – tanto pela gaveta quanto pelo *underflow* do ciclone, a depender da condição operacional utilizada – e sua umidade era determinada pelo método gravimétrico. A massa do material seco foi obtida após manter por 24 h os sólidos a 105 °C em estufa com circulação de ar (AOAC, 2002).

Tratamento dos dados: A cinética de secagem do processo foi descrita por meio do adimensional de umidade (Equação 1).

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

Para as velocidades do ar de 5 e 10 m/s, foi coletada uma massa pequena (<0,1% da alimentação) de material no *underflow* do ciclone do equipamento, então foi considerado nos cálculos que para essas condições não houve arraste de material particulado e a umidade calculada correspondeu somente àquela do material coletado na gaveta. Já para as condições com velocidade do ar de 18 m/s, houve arraste de material particulado, sendo que parte da amostra permaneceu sobre a tela da gaveta e parte foi coletada no *underflow*.

Para essas condições, foi considerado um valor “global” da umidade do minério presente no equipamento (X_{global}), conforme:

$$X_{global} = \frac{m_{wg} + m_{wu}}{m_g + m_u} \quad (2)$$

Em que m_{wg} e m_{wu} são a massa de água presente no material da gaveta e do *underflow*, respectivamente; m_g e m_u são a massa total da amostra coletada na gaveta e no *underflow* do ciclone, respectivamente. Conforme constatado durante os experimentos, toda amostra coletada no *underflow* estava seca e foi utilizado $m_{wu} = 0$.

Foram feitas réplicas dos testes e os dados apresentaram reprodutibilidade. O maior valor para o desvio padrão entre as medidas experimentais e suas réplicas foi de 0,61 pontos percentuais para a umidade em base úmida.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de cinética de secagem do minério de ferro no equipamento construído são apresentadas na Figura 6, para três diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem.

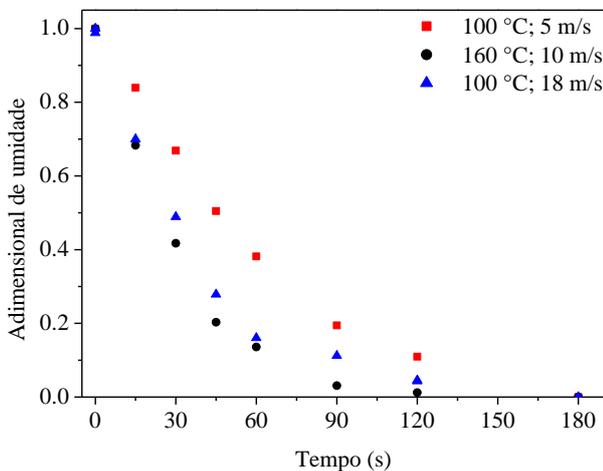


Figura 6: Cinéticas de secagem para os finos de minério de ferro realizadas no equipamento construído, para diferentes condições de temperatura e velocidade do ar.

Como esperado, o tempo de secagem diminuiu com o aumento da velocidade do ar e da temperatura. Para a secagem completa da amostra, foram necessários 120 s para a condição a 160 °C e 10 m/s. Por outro lado, as demais condições requereram cerca de 3 min.

Vale ressaltar que devido a ampla faixa de velocidade do ar operada pelo equipamento, poderiam ser constatados sensorialmente comportamentos típicos de leito fixo, fluidizado e/ou pneumático a depender da velocidade do ar utilizada. Não foram observados fluidização ou arraste significativo da amostra para a velocidade do ar de 5 m/s, comportando-se esta como leito fixo. Para a velocidade do ar de 10 m/s ocorreu a fluidização do leito, que foi detectada pelo som do choque das partículas com a parede do equipamento e com o fundo da gaveta. Porém, para essa condição, não foram coletadas partículas no *underflow* do ciclone, o que indica que para essa condição não houve transporte pneumático do material até o final da coluna. Por outro lado, durante a secagem para a velocidade de 18 m/s, houve coleta de material particulado tanto na gaveta quanto no *underflow* do ciclone, indicando que houve fluidização e também arraste do material particulado.

Foi observado um aumento do arraste de sólido particulado com o tempo de secagem para a condição de temperatura do ar de secagem a 100 °C e 18 m/s (Figura 7). Tal comportamento pode ter ocorrido devido à secagem do material e atrito do ar com os aglomerados formados, bem como a fluidização da amostra, que podem ter causado a quebra dos aglomerados e conseqüente arraste do particulado fino. No *underflow* do ciclone, foi encontrado somente pó fino seco, não sendo observada a presença de aglomerados de partículas.

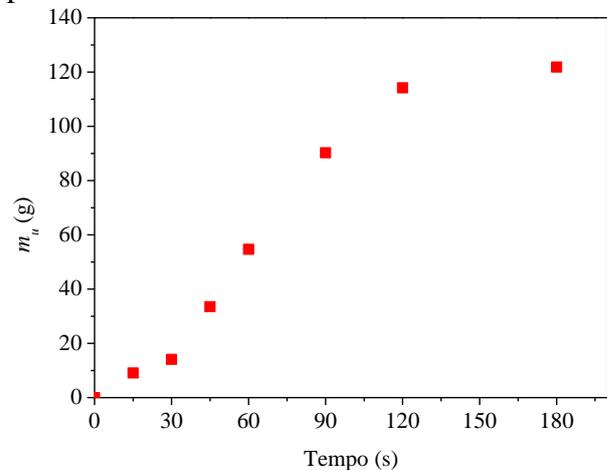


Figura 7: Massa de material coletado no *underflow* do ciclone em função do tempo de secagem para $T_f = 100$ °C; $u_f = 18$ m/s.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o projeto e construção do secador convectivo de minério de ferro. O equipamento construído pode operar em ampla faixa de temperaturas e velocidades do ar, bem como possibilitou a obtenção de curvas de cinéticas de secagem de finos de minério de ferro para diversas condições. A análise do comportamento de redução de umidade do minério realizada em escala de laboratório é importante para o projeto de equipamentos em escala industrial, bem como para o desenvolvimento de modelos matemáticos apropriados para a simulação de processos.

A descrição detalhada dos aspectos de construção desse equipamento pode contribuir para o desenvolvimento de secadores em escala de laboratório para materiais que apresentem comportamento ou necessidades operacionais similares.

NOMENCLATURA

m_g	Massa total de sólidos coletados na gaveta [kg]
m_u	Massa total de sólidos coletados no <i>underflow</i> do ciclone [kg]
m_{wg}	Massa de água contida nos sólidos coletados na gaveta [kg]
m_{wu}	Massa de água contida nos sólidos coletados no <i>underflow</i> do ciclone [kg]
X_{eq}	Umidade de equilíbrio dinâmico [kg_água/kg_sólido seco]
X_{global}	Umidade global [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

REFERÊNCIAS

GHOSHDASTIDAR, P S; BHARGAVA, G; CHHABRA, R P. (2002). Computer Simulation of Heat Transfer During Drying and Preheating of Wet Iron Ore. *Drying Technology*, v. 20, n. 1, p. 19–35.

- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION – IMO. Amendments (05-19) to the International Maritime Solid Bulk Cargoes (IMSBC) Code (on 1 January 2021). (2019).
- MUNRO, M.; MOHAJERANI, A. Determination of the transportable moisture limit of iron ore fines for the prevention of liquefaction in bulk carriers. (2014). *Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics (ICH 2014)*, p.1-8.
- NAMKUNG, Won; CHO, Minyoung. (2004), Pneumatic Drying of Iron Ore Particles in a Vertical Tube. *Drying Technology*, v. 22, n. 4, p. 877–891.
- SEBORG, D. E.; EDGAR, T.F.; MELLICHAMP, D.A. (2003), *Process dynamics and control*, John Wiley & sons, 2ª ed.
- SOUZA, A.S.; SOUZA PINTO, T.C.; PÁDUA, T.F.; BÉTTEGA, R., (2022), Drying Kinetics of Iron Ore Pellet Feed in a Fluidized Bed, *Anais do 22nd International Drying Symposium, Worcester, Massachusetts, USA*.
- 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*, v. 39, p. 1359-1370.
- WU, Z. H. et al. (2010), Dewatering and drying in mineral processing industry: Potential for innovation. *Drying Technology*, v. 28, n. 7, p. 834–842.