



ALIMENTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO PARA A SECAGEM EM CICLONE

LUANA B. GENARO^{1*}, ALFREDO M. SARKIS², THIAGO C. S. PINTO², THIAGO F. PÁDUA¹,
RODRIGO BÉTTEGA¹

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

²Centro de Desenvolvimento Mineral – Vale, Minas Gerais – Brasil

*e-mail: luana.genaro@outlook.com

RESUMO – A mineração busca o aumento da eficiência dos processos de secagem do minério de ferro, sendo necessário o desenvolvimento de alimentadores de sólidos. Desta forma, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um alimentador de minério de ferro úmido para a secagem em ciclone de bancada. O material foi caracterizado quanto as suas propriedades físicas, de dinâmica da partícula e de escoabilidade. A alimentação foi testada em um transportador helicoidal e em dois protótipos para o desenvolvimento e implementação de um alimentador do tipo haste. Os experimentos com o alimentador do tipo haste foram conduzidos para as umidades do minério de 0,06, 0,08 e 0,10 $\text{g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{sólido úmido}}^{-1}$, velocidades do ar de $10,48 \pm 0,12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $15,03 \pm 0,09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ e $19,98 \pm 0,12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, vazões de sólidos de $0,786 \pm 0,001 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ e $4,403 \pm 0,007 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ para as configurações vertical e horizontal do alimentador. Foram obtidas as porcentagens de arraste e de eficiência de coleta da massa seca alimentada. A secagem em ciclone foi avaliada através da determinação da redução da umidade do minério coletado no *underflow*. Os resultados mostraram que a metodologia de testes e de prototipagem foi adequada para o desenvolvimento do alimentador do tipo haste. A umidade do minério de 0,06 $\text{g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{sólido úmido}}^{-1}$, velocidade do ar de $19,98 \pm 0,12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ e vazão de sólidos de $0,786 \pm 0,001 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ foram as melhores condições de operação do alimentador do tipo haste. Para a secagem, foi verificado o potencial de redução de umidade do minério utilizando o ciclone separador como secador.

INTRODUÇÃO

O minério de ferro ocupa a segunda posição em geração de receitas para a exportação brasileira (USGS, 2020). Esta *commodity* é a matéria prima base para a produção do aço, fundamental para a construção civil e para os setores industriais e de transportes (Holmes e Lu, 2015). Na cadeia de extração e beneficiamento do minério, a umidade precisa ser reduzida, evitando excedentes a TML (*Transportable Moisture Limit*), entupimentos de correias transportadoras e a redução da eficiência dos altos-fornos e dos processos da mineração (Souza Pinto *et al.*, 2020).

Para o desenvolvimento de novas tecnologias de secagem, que reduzam a umidade do minério, pode ser necessária a implementação de sistemas de alimentação de sólidos eficientes. Na mineração geralmente são utilizados alimentadores de sapatas, de esteiras, vibratórios, de gavetas, de parafusos, de válvula rotativa, de mesa, entre outros (Chaves, 2012). Entretanto, não é encontrado na literatura um alimentador específico para o minério úmido injetado diretamente em uma corrente de ar. Materiais coesivos ou pegajosos como o minério de ferro, podem necessitar de projetos específicos de alimentadores (Chaves, 2012).

Desta forma, o objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de um alimentador de sólidos que opere com minério

de ferro *pellet feed* úmido, visando alimentar esse material para a secagem em um ciclone de bancada. Para isso, o minério foi caracterizado quanto as propriedades físicas, de dinâmica da partícula e de escoabilidade. A metodologia de desenvolvimento do alimentador consistiu na prototipagem de um alimentador do tipo haste. O desempenho do alimentador foi avaliado com base no percentual de arraste do material alimentado. Os experimentos de secagem em ciclone avaliaram a redução da umidade do minério coletado no *underflow*.

MATERIAIS E MÉTODOS

Material

O material utilizado neste trabalho foi o minério de ferro “Global de Embarque” proveniente de Carajás no Pará, fornecido pelo Instituto Tecnológico Vale. Para o preparo das amostras, o minério *in natura* foi seco em estufa a 105 °C. Após, foi separado em peneiras Tyler, sendo a fração de diâmetro inferior a 500 µm, correspondente ao minério *pellet feed*, posteriormente hidratada e empregada nos experimentos de caracterização, alimentação de sólidos e de secagem.

Umidade

A umidade foi determinada pelo método de estufa a 105 °C, descrito por Molnár (2006). Nesta metodologia, as amostras de minério permaneceram em estufa por um período de 24 horas para a determinação da massa seca. A umidade do material foi então determinada pelas Equações 1 e 2.

$$X_{bs} = \frac{m_u - m_s}{m_s} \quad (1)$$

$$X_{bu} = \frac{m_u - m_s}{m_u} \quad (2)$$

onde, X_{bs} é a umidade em base seca, X_{bu} a umidade em base úmida, m_u é a massa do material úmido e m_s é a massa seca.

Umidificação

O minério de ferro foi hidratado até as umidades de 0,06, 0,08 e 0,10 em base úmida, pela adição de água líquida às amostras previamente secas. A metodologia de umidificação seguiu o procedimento utilizado por Souza Pinto *et al.* (2020). Na Figura 1 são apresentadas fotografias do minério de ferro com diferentes umidades.

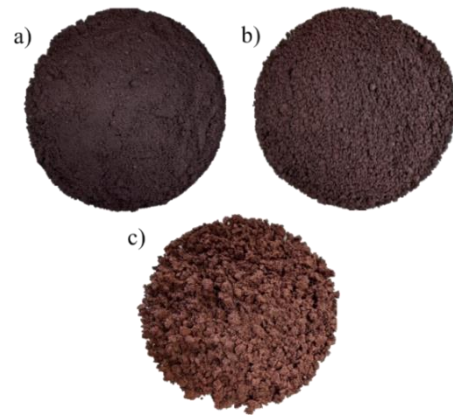


Figura 1: Fotografias do minério de ferro com umidades de: a) 0,06 em b.u. b) 0,08 em b.u. c) 0,10 em b.u.

Imagens de microscopia óptica utilizando o microscópio OLYMPUS BX60, são apresentadas na Figura 2 para o minério hidratado em diferentes níveis de umidade.

Caracterização física do minério de ferro

A caracterização física das partículas foi realizada utilizando a análise digital de imagens. Ressalta-se que o termo “partículas” se refere aos aglomerados de minério úmido. O procedimento experimental foi adaptado da metodologia de Rocha (2022) para a caracterização da borra de café. Para isso, foram capturadas imagens do minério com umidades de 0,06, 0,08 e 0,10 em b.u., utilizando o microscópio digital USB da Electronic Magnifier com câmera de 2 MP. As imagens foram analisadas utilizando o *software* de domínio público ImageJ 1.50b. O procedimento consistiu em transformar as imagens coloridas em imagens de 8-bit, realizar o ajuste de *threshold* e aplicar a ferramenta *watershed*, que identificou os aglomerados de partículas em contato. Assim, foram determinadas as áreas projetadas dos aglomerados (A_p), os perímetros (P), as circularidades (Cir), as razões de aspecto (AR) e o diâmetro do círculo com a mesma área projetada do aglomerado (D_p). A seguir são apresentadas as equações para a determinação da Cir , da AR e do D_p .

$$Cir = \frac{4 \pi A_p}{P^2} \quad (3)$$

$$AR = \frac{\text{maior eixo da partícula}}{\text{menor eixo da partícula}} \quad (4)$$

$$D_p = 2 \sqrt{\frac{A_p}{\pi}} \quad (5)$$

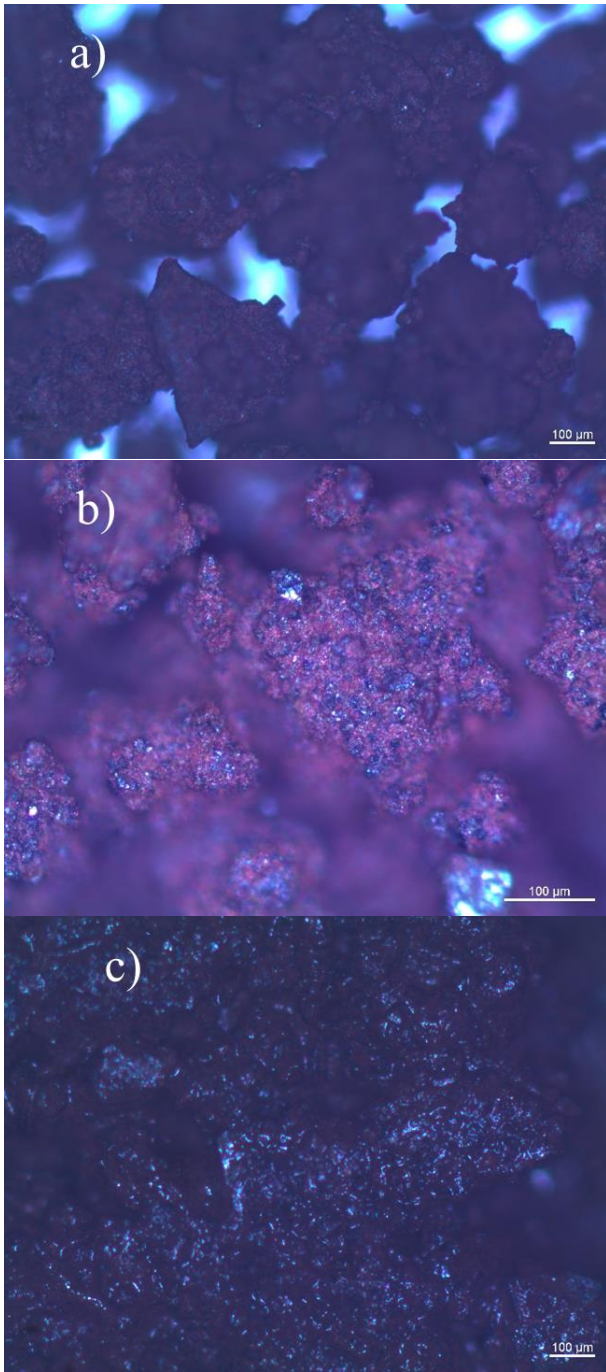


Figura 2: Imagens de microscopia óptica do minério de ferro com umidades de: a) 0,06 em b.u. b) 0,08 em b.u. c) 0,10 em b.u.

Também, foram determinadas a densidade *bulk* aerada (ρ_{ba}) e a densidade *bulk* compactada (ρ_{bc}) utilizando o método de proveta. O procedimento consistiu em adicionar $70,30 \pm 0,64$ g de minério de ferro úmido em uma proveta de vidro de 250 mL e realizar a medida do volume ocupado pelo material. Para a densidade compactada, foram realizadas batidas da proveta até o volume do minério úmido permanecer constante. Um aparato de madeira delimitou a altura para as batidas da proveta. Para avaliar a coesão e

assim definir indiretamente as características de escoabilidade do minério em diferentes umidades, foi determinado o índice de Hausner (HR) através da Equação 6 (Abdullah e Geldart, 1999).

$$HR = \frac{\rho_{bc}}{\rho_{ba}} \quad (6)$$

Dinâmica da partícula no transporte pneumático

O funcionamento do alimentador de sólidos do tipo haste, cuja metodologia de desenvolvimento é apresentada no próximo item, depende do transporte pneumático dos sólidos. Desta forma, foram utilizadas correlações da literatura para a estimativa da velocidade crítica para o transporte pneumático vertical - velocidade de *choking* (v_c) e a velocidade crítica para o transporte pneumático horizontal - velocidade de *saltation* (v_s), que são apresentadas no Tabela 1.

Tabela 1: Correlações da literatura para a estimativa da velocidade de *choking* e de *saltation*.

Autor	Correlação
Leung <i>et al.</i> (1971)	$v_c = 32,3 \left(\frac{\dot{m}_p}{\rho_p} \right) + 0,97 v_T$ (7)
Yousfi e Gau (1947)	$v_c^{1,28} = 32 \sqrt{\frac{g D_P}{Re^{0,06}} \left(\frac{\dot{m}_p}{\rho_p} \right)^{0,28}}$ (8)
Matsen (1982)	$v_c = 1,074 v_T \left(\frac{\dot{m}_p}{\rho_p} \right)^{0,227}$ (9)
Yang (1975)	$\frac{v_c}{\varepsilon_c} - v_T = \frac{\dot{m}_p}{\rho_p A_T (1 - \varepsilon_c)}$ (10)
	$6,81 \times 10^5 \left(\frac{\rho_f}{\rho_p} \right)^{2,2} = \frac{2gD(\varepsilon_c^{-4,7} - 1)}{\left(\frac{v_c}{\varepsilon_c} - v_T \right)^2}$
Punwani <i>et al.</i> (1982)	$\frac{v_c}{\varepsilon_c} - v_T = \frac{\dot{m}_p}{\rho_p A_T (1 - \varepsilon_c)}$ (11)
	$\rho_f^{0,77} = \frac{2,250 D (\varepsilon_c^{-4,7} - 1)}{\left(\frac{v_c}{\varepsilon_c} - v_T \right)^2}$
Risk apud Cremasco (2018)	$v_s = \left[a_1 \left(\frac{\dot{m}_p}{\rho_p A_T} \right) (g D)^{a_2} \right]^{a_3}$ (12)
	$a_1 = 10^{1,44 D_P} + 1,96$
	$a_2 = 0,55 D_P + 1,25$
	$a_3 = \frac{1}{1,1 D_P + 3,5}$

A velocidade terminal da partícula não esférica isolada (v_T) foi estimada pela correlação de Coelho e Massarani (1996) apresentada pela Equação 13.

$$Re = \left[\left(\frac{K_1 c_D Re^2}{24} \right)^{-1,2} + \left(\frac{c_D Re^2}{K_2} \right)^{-0,6} \right]^{-\frac{1}{1,2}} \quad (13)$$

$$c_D Re^2 = \frac{4 \rho_f (\rho_P - \rho_f) g D_P^3}{3 \mu^2} \quad (14)$$

$$K_1 = 0,843 \log_{10}(\varphi/0,65) \quad (15)$$

$$K_2 = 5,31 - 4,88 \varphi \quad (16)$$

Desenvolvimento do alimentador de sólidos

O alimentador de minério úmido foi desenvolvido com base em resultados qualitativos e quantitativos de testes experimentais realizados em um alimentador helicoidal e na prototipagem de um alimentador do tipo haste. As etapas do desenvolvimento do alimentador de sólidos são sintetizadas no fluxograma da Figura 3. Essas etapas foram necessárias pois as características do minério úmido proporcionaram dificuldades para a alimentação. Em cada etapa, foram testadas melhorias no projeto do alimentador.

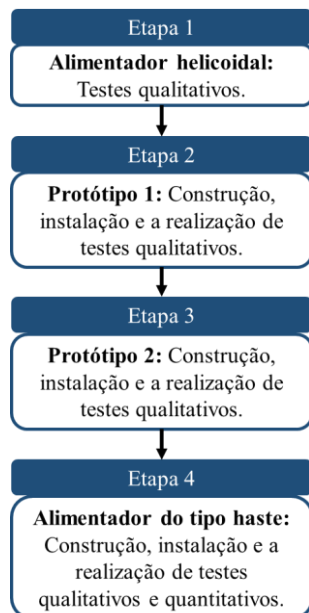


Figura 3: Fluxograma das etapas de desenvolvimento do alimentador de sólidos.

Na etapa 1, os testes qualitativos foram realizados no alimentador helicoidal com diâmetro de hélice de 25 mm, passo da hélice de 15 mm, diâmetro do eixo de 10 mm e comprimento de 250 mm. Este alimentador foi desenvolvido por Rocha (2019) para a alimentação de borra de café em leito

vibrofluidizado. Os testes qualitativos foram realizados com a presença dos sólidos e sem o acoplamento do alimentador na tubulação de ar.

Os resultados obtidos na etapa 1 foram considerados no projeto do alimentador protótipo 1, da etapa 2 (Figura 4 – a). Este equipamento possibilita a alimentação de uma batelada de sólidos, através do acoplamento de uma célula removível. O alimentador possui mecanismo análogo ao de uma seringa ou um pistão hidráulico, com a alimentação de sólidos tangencial à entrada de ar na tubulação, com um ângulo de 45°.

A Figura 4 – b) apresenta uma ilustração do alimentador protótipo 2, da etapa 3. Este alimentador possui uma célula de alimentação removível, com 5 compartimentos de 5 cm altura, onde o minério foi empacotado. A haste do pistão se desloca no sentido descendente, de forma a possibilitar em cada compartimento, o contato entre a fase sólida e fluida. A alimentação dos sólidos foi realizada pelo transporte pneumático da fase sólida. O ângulo de 90° entre a célula e a tubulação de ar foi utilizado, para obter um maior valor escalar da componente vertical da força gravitacional no movimento dos sólidos e também facilitar o projeto mecânico do alimentador.

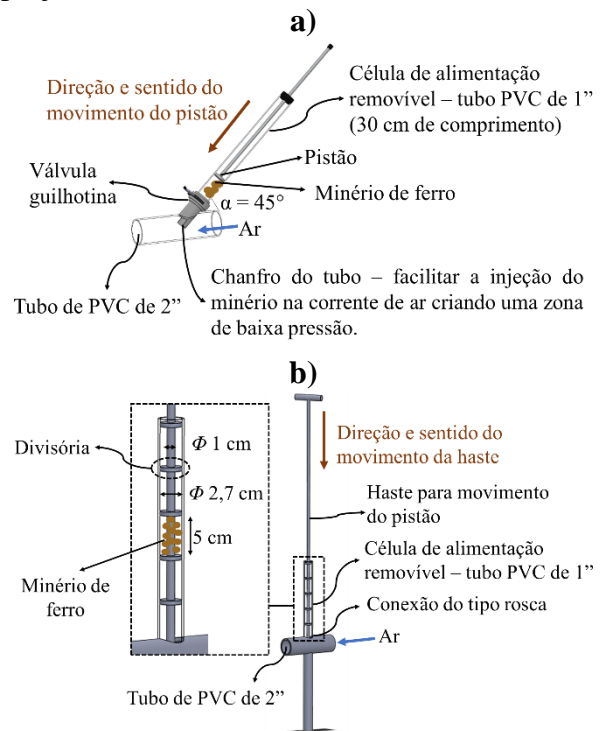


Figura 4: a) Ilustração esquemática do alimentador protótipo 1. b) Ilustração esquemática do alimentador protótipo 2. Desenho fora de escala.

Para os testes realizados utilizando os protótipos 1 e 2 e do alimentador do tipo haste, foi utilizada a unidade experimental de secagem de minério de ferro construída por Souza (2022), que é ilustrada na Figura 5. Nesta unidade, o ar foi fornecido por um soprador de ar Repicky de 21 HP, a vazão foi ajustada por válvulas de 4" de um by-pass e medida por uma placa de orifício. O equipamento possui um sistema de aquecimento de ar com 12 resistências de 1000 W cada. A instrumentação permite a aquisição dados de pressão e de temperatura do ar.

Pela facilidade de instalação e por se tratarem de testes qualitativos, os protótipos 1 e 2 foram instalados no desvio *by-pass* da unidade de secagem, conforme ilustrado na Figura 5. Estes testes foram conduzidos com ar em temperatura ambiente, o que possibilitou a construção dos protótipos utilizando tubos de PVC, e tarugos de nylon.

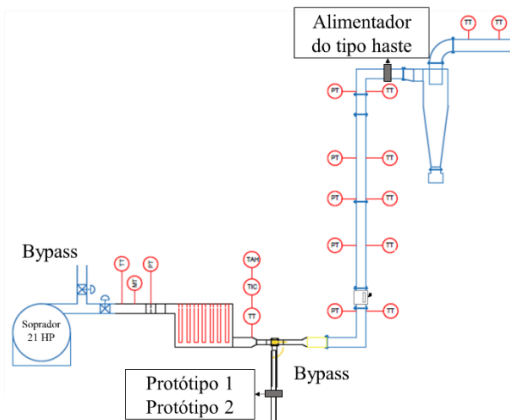


Figura 5: Ilustração esquemática do secador de minério de ferro. Desenho fora de escala. Imagem adaptada de Souza (2022).

Para a etapa 4, o alimentador do tipo haste foi instalado na entrada do ciclone da unidade experimental de secagem. Este alimentador possui as adaptações observadas como necessárias nos testes realizados com os protótipos 1 e 2. A Figura 6 ilustra o alimentador, que possui 6 compartimentos de 5 cm de altura para o empacotamento do minério, com divisórias de alumínio de 0,5 cm de espessura entre cada compartimento. A estrutura do equipamento foi construída em aço e alumínio. A operação do alimentador do tipo haste é similar ao protótipo 2, com o movimento manual da haste, deslocada perpendicularmente ao escoamento do ar na tubulação. Para o carregamento dos sólidos, a

célula removível foi desmontada como na Figura 6 – c), e o minério úmido extrudado em peneira de 6 mm de abertura foi adicionado nos compartimentos.

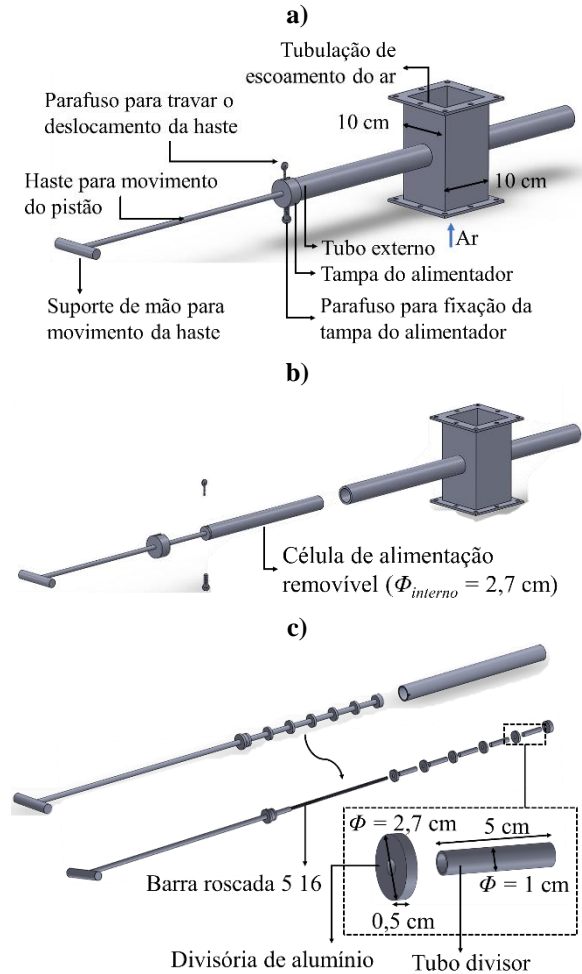


Figura 6: a) Ilustração esquemática do alimentador de sólidos do tipo haste. b) Vista explodida da célula de alimentação removível. c) Ilustração esquemática da haste do alimentador. Desenho fora de escala.

Avaliação do desempenho do alimentador do tipo haste e da secagem em ciclone

O desempenho do alimentador de sólidos do tipo haste, Figura 6, foi avaliado utilizando como parâmetros a porcentagem de arraste da massa seca alimentada, determinada pela Equação 17, e a eficiência de coleta da massa seca no *underflow* do ciclone determinada pela Equação 18.

$$\text{arraste} = \frac{m_{\text{seca}_a} - m_{\text{seca}_{\text{retida}}}}{m_{\text{seca}_a}} \times 100 \quad (17)$$

$$\eta_{\text{underflow}} = \frac{m_{\text{seca}_{\text{underflow}}}}{m_{\text{seca}_a}} \times 100 \quad (18)$$

onde m_{seca_a} é a massa seca adicionada na célula removível do alimentador, $m_{\text{seca}_{\text{retida}}}$ é a massa

seca retida na célula removível após a alimentação e $m_{seca_underflow}$ é a massa seca coletada no *underflow* do ciclone.

Os experimentos foram realizados utilizando velocidades do ar de $10,48 \pm 0,12$, $15,03 \pm 0,09$ e $19,98 \pm 0,12$ $m \cdot s^{-1}$ em relação à área da seção transversal da tubulação de escoamento do ar ($0,1 m \times 0,1 m$). Para a alimentação, $220,19 \pm 0,36$ g de minério de ferro com umidades de 0,06, 0,08 e 0,10 em base úmida foram extrudadas em uma peneira de 6 mm de abertura e empacotadas em 5 compartimentos do alimentador do tipo haste. Foram utilizadas duas velocidades de movimento axial da haste do alimentador: 1 cm a cada 10 segundos e de 5 cm a cada 10 segundos, correspondentes às vazões mássicas de sólidos de $0,786 \pm 0,001$ $g \cdot s^{-1}$ e $4,403 \pm 0,007$ $g \cdot s^{-1}$, respectivamente. Também, foram avaliadas duas configurações do alimentador no desempenho do processo, conforme ilustrado pela Figura 7. Os experimentos foram realizados em triplicata, totalizando 108 ensaios.

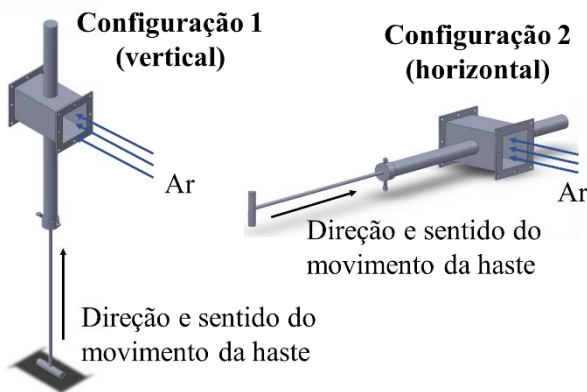


Figura 7: Ilustração esquemática das configurações testadas para a alimentação de sólidos. Desenho fora de escala.

Para avaliar a secagem do minério em ciclone, foram determinadas as umidades das massas coletadas no *underflow* e a redução de umidade (RU) utilizando a Equação 19. Esta equação foi empregada por Oliveira *et al.* (2011) na secagem de bagaço de cana de açúcar em ciclone. A temperatura utilizada para a alimentação do ar no ciclone foi de $37,86 \pm 4,22$ °C.

$$RU = \frac{X_0 - X_{underflow}}{X_0} \quad (19)$$

Na Equação 19, X_0 é a umidade do minério alimentado no ciclone e $X_{underflow}$ é a umidade do minério coletado no *underflow*, ambas em base seca.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização física do minério de ferro, dinâmica da partícula e escoabilidade

Na Tabela 2 são apresentadas as propriedades físicas obtidas para o minério de ferro com umidade de 0,06, 0,08 e 0,10 em base úmida. O aumento da umidade provocou o aumento dos valores médios da área projetada, do perímetro, da razão de aspecto, do diâmetro médio do aglomerado, das densidades *bulk* aerada e compactada. Estes resultados indicam que o aumento da umidade possibilitou a formação de aglomerados de partículas maiores, que podem ser visualizados na Figura 1. Por outro lado, a circularidade não apresentou variação significativa com o aumento da umidade do material. Além disso, destaca-se que os desvios das medidas são elevados pois foi verificado visualmente uma distribuição de tamanhos dos aglomerados para cada umidade do minério.

Tabela 2: Valores médios das propriedades físicas dos aglomerados de minério de ferro com umidade de 0,06, 0,08 e 0,10 em base úmida.

Propriedade	Umidade 0,06 (b.u.)	Umidade 0,08 (b.u.)	Umidade 0,10 (b.u.)
A_p [mm ²]	$0,061 \pm 0,065$	$0,776 \pm 1,526$	$27,892 \pm 22,114$
P [mm]	$0,926 \pm 0,572$	$3,241 \pm 2,603$	$21,387 \pm 9,888$
Cir [-]	$0,707 \pm 0,138$	$0,680 \pm 0,130$	$0,688 \pm 0,126$
AR [-]	$1,477 \pm 0,348$	$1,484 \pm 0,362$	$1,488 \pm 0,441$
D_p [mm]	$0,263 \pm 0,145$	$0,826 \pm 0,547$	$5,510 \pm 2,271$
ρ_{ba} [g·cm ⁻³]	$1,53 \pm 0,05$	$1,69 \pm 0,04$	$2,22 \pm 0,13$
ρ_{bc} [g·cm ⁻³]	$2,15 \pm 0,06$	$2,70 \pm 0,17$	$2,96 \pm 0,02$

Avaliando a escoabilidade do minério, de acordo com Abdullah e Geldart (1999) os índices de Hausner apresentados na Tabela 3 para as umidades do minério de 0,06 e 0,08 (b.u.), caracterizam o escoamento dos sólidos

como coesivo-difícil e de escoamento médio para a umidade de 0,10 (b.u.).

Tabela 3: Escoabilidade do minério em diferentes umidades de acordo com o índice de Hausner.

Umidade (b.u.)	Índice de Hausner (HR)	Escoamento
0,06	1,41 ± 0,03	Coesivo, difícil
0,08	1,60 ± 0,13	Coesivo, difícil
0,10	1,33 ± 0,07	Médio

Nas Tabelas 4 e 5 são apresentadas a velocidade terminal, de *choking* e de *saltation* estimadas para o minério de ferro com umidades de 0,06, 0,08 e 0,10 (b.u.) e vazões mássicas de sólidos de $0,786 \pm 0,001 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ e $4,403 \pm 0,007 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente. Ressalta-se a importância destes parâmetros fluidodinâmicos, pois o desempenho do alimentador do tipo haste depende do transporte das partículas sólidas em contato com o escoamento do ar.

Tabela 4: Velocidade terminal, velocidade de *choking* e de *saltation* estimadas por correlações da literatura para a vazão de alimentação de sólidos de $0,786 \pm 0,001 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$.

Velocidade	Umidade de 0,06 (b.u.)	Umidade de 0,08 (b.u.)	Umidade de 0,10 (b.u.)
$v_T \text{ (cm}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$	142,54	355,70	1008,44
$v_c \text{ (cm}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ Leung <i>et al.</i> (1971)	150,13	354,48	986,81
$v_c \text{ (cm}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ Yousfi e Gau (1947)	195,81	278,01	508,35
$v_c \text{ (cm}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ Matsen (1982)	121,96	289,02	802,48
$v_c \text{ (cm}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ Yang (1975)	163,44	378,58	1032,12
$v_c \text{ (cm}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ Punwani <i>et al.</i> (1982)	144,23	356,94	1008,68
$v_s \text{ (cm}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ Risk apud Cremasco (2018)	27,78	48,17	357,09

As estimativas das correlações indicam que o aumento da umidade do minério aumenta a velocidade terminal. Esse resultado é esperado devido ao aumento do diâmetro do

aglomerado. Também, verifica-se o aumento da velocidade de *choking* e de *saltation* com o aumento da umidade e da vazão mássica de sólidos. Desta forma, constata-se que para a alimentação do minério úmido utilizando o alimentador do tipo haste da Figura 6, a velocidade do ar deve ser maior que as condições críticas de transporte pneumático e, que estas são influenciadas pela umidade do material, pela vazão mássica de sólidos alimentada e pelas forças de coesão existentes entre os aglomerados úmidos do minério.

Tabela 5: Velocidade de *choking* e de *saltation* estimadas por correlações da literatura para a vazão de alimentação de sólidos de $4,403 \pm 0,007 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$.

Parâmetro	Umidade 0,06 (b.u.)	Umidade 0,08 (b.u.)	Umidade 0,10 (b.u.)
$v_c \text{ (cm}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ Leung <i>et al.</i> (1971)	204,36	397,66	1026,20
$v_c \text{ (cm}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ Yousfi e Gau (1947)	285,09	404,78	740,13
$v_c \text{ (cm}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ Matsen (1982)	180,11	426,81	1185,05
$v_c \text{ (cm}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ Yang (1975)	179,56	396,20	1050,25
$v_c \text{ (cm}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ Punwani <i>et al.</i> (1982)	145,17	357,13	1006,78
$v_s \text{ (cm}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ Risk apud Cremasco (2018)	43,71	71,11	427,35

As velocidades do ar de $15,03 \pm 0,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e de $19,98 \pm 0,12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ utilizadas nos experimentos com o alimentador do tipo haste, são maiores do que as velocidades de *choking* e de *saltation* estimadas para o minério de ferro com umidade de 0,06 e 0,08 (b.u.). Para velocidades do ar inferiores as de *choking* no transporte pneumático vertical, as partículas de minério passariam a se mover no sentido descendente, quando em contato com ar em cada compartimento do alimentador. Para o transporte pneumático horizontal, velocidades do ar inferiores à de *saltation* provocariam a sedimentação das partículas no duto de transporte (Cremasco, 2018). Avaliando as

condições críticas de transporte do minério de ferro com umidade de 0,10 (b.u.) das Tabelas 4 e 5, a velocidade do ar de $10,48 \pm 0,12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ é próxima ou inferior à estimada pelas correlações, indicando que esta velocidade do ar não seria suficiente para o transporte vertical do minério após a alimentação. Entretanto, ressalta-se que as correlações podem subestimar as condições críticas, uma vez que não consideram o efeito das interações entre partículas e das forças de adesão, que podem estar presentes no transporte dos aglomerados úmidos de minério de ferro.

Considerações sobre o desenvolvimento do alimentador de sólidos

Nesta seção são apresentadas as observações experimentais e os resultados qualitativos obtidos nas etapas de desenvolvimento do alimentador de sólidos descritas no fluxograma da Figura 3.

Etapa 1: Nos testes conduzidos com o alimentador helicoidal de Rocha (2019) para o minério de ferro com umidade de 0,06 e 0,10 (b.u.), foi observada a adesão do material no eixo helicoidal e nas paredes do equipamento, provocando a obstrução do escoamento dos sólidos e impedindo a alimentação. Além disso, o silo do alimentador também apresentou aderência do minério nas paredes, dificultando a alimentação contínua e uniforme do minério.

Etapa 2: O alimentador protótipo 1, Figura 4 – a), foi projetado para funcionar como um pistão mecânico, que promove o movimento mecânico dos sólidos até a tubulação de escoamento de ar, onde o material é transportado pneumáticamente. À priori, o arrasto pela fase gasosa e o movimento do pistão facilitaríamos a desobstrução e o transporte do minério. A célula de alimentação removível permite a operação semi-contínua, ideal para testes com restrição de quantidade de material disponível. A capacidade máxima de armazenamento da célula removível foi de 300 g de minério úmido.

Para os testes experimentais sem a presença do ar e apenas com sólidos, foi observada a formação de tarugos como os ilustrados na Figura 8. O material foi empacotado na célula após a extrusão em peneira de 6 mm, sendo o empacotamento realizado de uma altura fixa com o auxílio de um funil. Entretanto, com o movimento da

haste durante a alimentação, ocorreu a compactação do minério e a formação de tarugos que obstruíram a passagem dos sólidos. Este efeito foi mais acentuado para a umidade de 0,10 (b.u.).

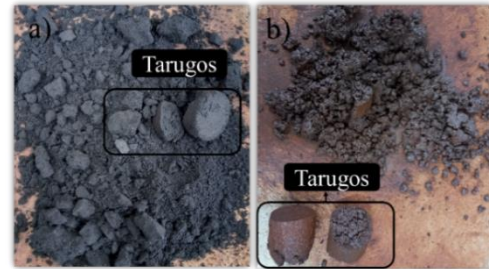


Figura 8: Tarugos formados após a compactação do minério no alimentador protótipo 1. Umidade do minério: a) 0,06 (b.u.). b) 0,10 (b.u.).

Os testes de alimentação conduzidos com velocidades do ar de 10, 20 e $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, para o alimentador instalado no *by-pass* da unidade de secagem na configuração horizontal, mostraram a inviabilidade da alimentação após a compactação dos sólidos e dificuldades para a movimentação da haste. Para o alimentador posicionado na vertical, com ângulo de 45° entre a célula removível e a tubulação de ar, a ação da força gravitacional contribuiu para o movimento dos sólidos. A configuração vertical possibilitou a alimentação de 300 g de minério para velocidades do ar de 10 e $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, entretanto não foi possível controlar a vazão de sólidos injetada na corrente de ar.

Etapa 3: No alimentador protótipo 2, Figura 4 – b), foram adicionadas divisórias na haste para reduzir a compactação e a formação de tarugos de minério. Compartimentos de 5 cm de altura se mostraram suficientes para o auxiliar o movimento axial das partículas úmidas. Além disso, as subdivisões aumentaram o controle das vazões de sólidos injetadas na corrente de ar. Um sistema similar de alimentação de sólidos foi utilizado por Grimm et al. (2017) para a secagem de rejeitos de fibras da reciclagem de papel, em ciclone secador.

Para os testes de alimentação conduzidos com velocidades do ar de 10, 20 e $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ com o alimentador instalado no *by-pass* da unidade de secagem, foi verificado o arraste de 180 g de minério com umidade de 0,10 (b.u.), nas configurações horizontal e vertical do alimentador. Não foi observada a

formação de tarugos de minério e a obstrução do movimento da haste do equipamento. Estes resultados permitiram a construção do alimentador do tipo haste ilustrado na Figura 7, cujo desempenho será avaliado no próximo item.

Análise do desempenho do alimentador do tipo haste

Na Figura 9 - a) e b) são apresentados os valores médios da porcentagem de arraste da massa seca do minério alimentado, para as vazões mássicas de sólidos de $0,786 \pm 0,001 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ e de $4,403 \pm 0,007 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente.

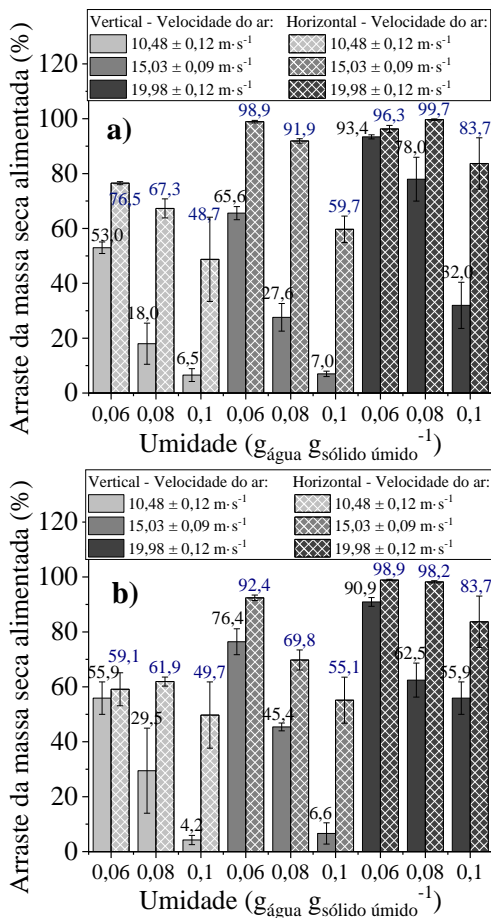


Figura 9: Porcentagem média de arraste da massa seca alimentada do minério com umidade de 0,06, 0,08 e 0,1 (b.u.), velocidades do ar de $10,48 \pm 0,12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $15,03 \pm 0,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $19,98 \pm 0,12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, para as configurações vertical e horizontal do alimentador. Vazão de alimentação de sólidos: a) $0,786 \pm 0,001 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$. b) $4,403 \pm 0,007 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$.

Avaliando as Figuras 9 – a) e b), para as três velocidades do ar e as configurações vertical e horizontal do alimentador, o aumento da umidade do minério provocou a diminuição do arraste da massa seca alimentada. Este

resultado mostra que o material retido nos compartimentos da haste aumentou proporcionalmente com a umidade do minério. Esta observação pode estar relacionada a adesão que ocorre entre os aglomerados úmidos, às interações entre o minério e as paredes do alimentador e a condição de escoamento médio de acordo com o índice de Hausner.

As Figuras 9 – a) e b) mostram que para o aumento da velocidade do ar foram obtidas as maiores porcentagens de arraste da massa seca, para as diferentes umidades e configurações do alimentador avaliadas. Esta observação está de acordo com o esperado para a dinâmica de escoamento das partículas no transporte pneumático dos sólidos utilizando o alimentador do tipo haste.

Por outro lado, as Figuras 9 - a) e b) mostram que o aumento da vazão mássica de sólidos provocou a diminuição da porcentagem de arraste. Este resultado possivelmente se relaciona com o menor tempo de contato entre as fases fluida e sólida para a maior vazão e também pela maior concentração de sólidos da corrente injetada no escoamento do ar.

O efeito da configuração do alimentador, pode ser observado no aumento do arraste dos sólidos para a configuração horizontal quando comparada à vertical. Para a umidade de 0,10 (b.u.) o aumento médio da porcentagem de arraste foi de 51,5 %. Já para a umidade de 0,06 (b.u.) que representa o escoamento coesivo, o aumento foi menos acentuado com valor médio de 14,5 %.

De forma geral, a configuração horizontal facilitou a injeção dos sólidos na tubulação de ar, principalmente para os maiores níveis de umidade do minério. Entretanto, esta melhora da porcentagem de arraste não influenciou no aumento da eficiência de coleta da massa seca no *underflow* do ciclone, conforme pode ser observado nos gráficos da Figura 10.

Nas Figuras 10 – a) e b) são apresentadas as eficiências médias de coleta da massa seca no *underflow* do ciclone, para as vazões de alimentação de sólidos de $0,786 \pm 0,001 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ e de $4,403 \pm 0,007 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente.

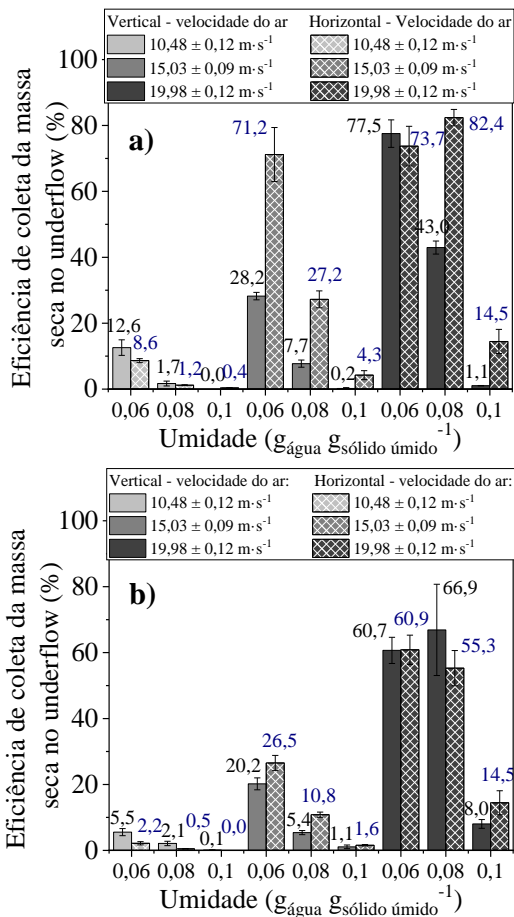


Figura 10: Média da eficiência de coleta da massa seca no *underflow*, para o minério alimentado a 0,06, 0,08 e 0,1 (b.u.), velocidades do ar de $10,48 \pm 0,12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $15,03 \pm 0,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $19,98 \pm 0,12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, para as configurações vertical e horizontal do alimentador. Vazão de alimentação de sólidos: a) $0,786 \pm 0,001 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$. b) $4,403 \pm 0,007 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$.

Avaliando o efeito da velocidade do ar, observa-se que a η_{coleta} aumentou com o aumento da velocidade. Para a velocidade de $10,48 \pm 0,12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ valores inferiores a 12,6 % de η_{coleta} foram observados para as diferentes umidades e vazões de sólidos, caracterizando uma condição não favorável para a alimentação do minério de ferro. Destaca-se que em condições ideais de operação do alimentador do tipo haste, espera-se um arraste da massa seca e a η_{coleta} de 100 %.

Os valores inferiores de eficiência de coleta da Figura 10, quando comparados com as elevadas porcentagens de arraste da Figura 9, mostram que nem todo o minério alimentado é coletado no *underflow* do ciclone. Este resultado pode ser relacionado com a formação de regiões de acúmulo de sólidos na tubulação de ar, uma vez que para velocidades inferiores

às condições críticas de transporte pneumático, o minério pode ser injetado na corrente do fluido, mas não ser transportado pneumaticamente. Ainda, devido as características do minério úmido, pode ocorrer a adesão do material nas superfícies da tubulação do ar e do ciclone, formando uma crosta de sólidos.

Outro efeito que pode estar presente na alimentação e no escoamento multifásico do ciclone, é a quebra dos aglomerados úmidos de minério em partículas de diâmetros inferiores, devido principalmente ao atrito fluido-partícula e fluido-parede e às forças centrífugas presentes. Partículas de diâmetros inferiores ao de corte da separação ciclônica são arrastadas pela corrente de ar do *overflow*, contribuindo para a diminuição da eficiência de coleta da massa seca. Este efeito não pode ser quantificado, uma vez que não foi possível coletar a massa de sólidos da corrente do *overflow*. Entretanto, a quebra dos aglomerados em partículas de diâmetros inferiores pode ser observada comparando a Figura 1 com as fotografias da Figura 11, que mostram o material coletado no *underflow* do ciclone.

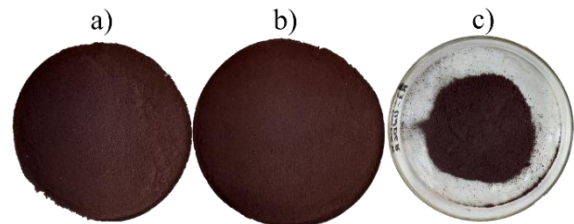


Figura 11: Fotografias do minério de ferro coletado no *underflow* do ciclone. Umidade alimentada: a) 0,06 (b.u.). b) 0,08 (b.u.). c) 0,10 (b.u.).

Avaliando o maior arraste de sólidos em conjunto com a maior eficiência de coleta da massa seca no *underflow*, as melhores condições experimentais para a utilização do alimentador do tipo haste obtidas foram para minério de ferro com umidade de 0,06 (b.u.), velocidade do ar de $19,98 \pm 0,12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, vazão mássica de sólidos de $0,786 \pm 0,001 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ para ambas as configurações vertical e horizontal do alimentador.

Secagem do minério de ferro em ciclone

Na Tabela 6 são apresentadas as umidades do *underflow* e o RU para a secagem do minério em ciclone utilizando o alimentador do tipo haste na configuração horizontal.

Tabela 6 – Umidade do *underflow* e RU para a secagem em ciclone utilizando o alimentador de sólidos do tipo haste na horizontal. Temperatura de alimentação do ar de $37,86 \pm 4,22$ °C.

Vazão de sólidos de $0,786 \pm 0,001$ g·s⁻¹.			
Umidade alimentada (b.u.)	Velocidade do ar (m·s ⁻¹)	Umidade <i>underflow</i> (b.u.)	RU [-]
0,06	$10,48 \pm 0,12$	$1,954 \cdot 10^{-4} \pm 2,763 \cdot 10^{-4}$	$0,997 \pm 0,005$
0,06	$15,03 \pm 0,09$	$0,002 \pm 0,000$	$0,959 \pm 0,003$
0,06	$19,98 \pm 0,12$	$0,002 \pm 0,000$	$0,970 \pm 0,004$
0,08	$10,48 \pm 0,12$	$0,004 \pm 0,003$	$0,951 \pm 0,042$
0,08	$15,03 \pm 0,09$	$0,002 \pm 0,000$	$0,974 \pm 0,004$
0,08	$19,98 \pm 0,12$	$0,005 \pm 0,000$	$0,944 \pm 0,005$
0,10	$10,48 \pm 0,12$	$0,018 \pm 0,005$	$0,815 \pm 0,051$
0,10	$15,03 \pm 0,09$	$0,003 \pm 0,001$	$0,966 \pm 0,006$
0,10	$19,98 \pm 0,12$	$0,015 \pm 0,003$	$0,850 \pm 0,035$
Vazão de sólidos de $4,403 \pm 0,007$ g·s⁻¹.			
Umidade alimentada (b.u.)	Velocidade do ar (m·s ⁻¹)	Umidade <i>underflow</i> (b.u.)	RU [-]
0,06	$10,48 \pm 0,12$	$0,001 \pm 0,001$	$0,990 \pm 0,014$
0,06	$15,03 \pm 0,09$	$0,009 \pm 0,003$	$0,844 \pm 0,046$
0,06	$19,98 \pm 0,12$	$0,018 \pm 0,001$	$0,705 \pm 0,016$
0,08	$10,48 \pm 0,12$	$0,012 \pm 0,009$	$0,847 \pm 0,110$
0,08	$15,03 \pm 0,09$	$0,009 \pm 0,004$	$0,888 \pm 0,044$
0,08	$19,98 \pm 0,12$	$0,027 \pm 0,001$	$0,667 \pm 0,016$
0,10	$10,48 \pm 0,12$	-	-
0,10	$15,03 \pm 0,09$	$0,003 \pm 0,002$	$0,973 \pm 0,015$
0,10	$19,98 \pm 0,12$	$0,015 \pm 0,003$	$0,850 \pm 0,035$

Os resultados apresentados na Tabela 6, mostram o grande potencial de secagem do minério utilizando o ciclone como secador, para a configuração horizontal do alimentador de sólidos. Observação semelhante também foi verificada para a configuração vertical. A maior

umidade do minério coletado no *underflow* foi de $0,027 \pm 0,001$ (b.u.), correspondendo a uma redução de umidade de $0,667 \pm 0,016$ em relação ao alimentado. Para a umidade do minério de 0,10 (b.u.) e a velocidade do ar de $10,48 \pm 0,12$ m·s⁻¹, condições não recomendadas para a utilização do alimentador do tipo haste, não foi possível avaliar a redução da umidade.

Pode ser observado que o aumento da vazão de sólidos diminuiu a redução de umidade. Esta observação se relaciona ao aumento da concentração dos sólidos injetados na corrente de ar e ao menor tempo de contato entre a fase sólida e o ar de secagem no *underflow*. Oliveira et al. (2011), também observaram o efeito da vazão mássica de sólidos na secagem de bagaço de cana de açúcar em ciclone.

Para o aumento da velocidade do ar, observa-se a tendência de diminuição da redução da umidade do minério. De acordo com Souza Pinto et al. (2020), o minério apresenta períodos prolongados de taxa de secagem constante, controladas principalmente por mecanismos convectivos de secagem. Desta forma, com o aumento da velocidade do ar era esperada a diminuição das resistências à transferência de massa por convecção, favorecendo à secagem. Entretanto, o tempo de residência do minério do ciclone pode diminuir com o aumento da velocidade do ar e, este efeito combinado ao aumento da concentração de sólidos devido a maior porcentagem de arraste, pode desfavorecer a secagem.

Ainda na Tabela 6, observa-se a tendência de aumento da umidade do *underflow* com o aumento da umidade de alimentação de sólidos, para as velocidades do ar de $15,03 \pm 0,09$ m·s⁻¹ e $19,98 \pm 0,12$ m·s⁻¹. Este resultado deve estar relacionado a maior quantidade de umidade disponível para a transferência de massa, para um mesmo tempo de residência do minério no ciclone.

CONCLUSÕES

Os resultados da caracterização física do minério mostraram o aumento do diâmetro médio de partícula, perímetro, área projetada densidades *bulk* aerada e compactada com o aumento da umidade. Como consequência, as estimativas das correlações da literatura para a velocidade de *choking* e de *saltation*, condições

críticas de transporte pneumático, aumentaram com a umidade do material.

Os testes com o alimentador helicoidal e o desenvolvimento dos protótipos 1 e 2, foram úteis para o projeto e operação do alimentador do tipo haste. Este alimentador apresentou potencial de utilização para a alimentação de minério úmido no ciclone de bancada. Os resultados mostraram a influência da umidade do minério, vazão mássica de sólidos, velocidade do ar e da configuração do alimentador do tipo haste na porcentagem média de arraste e na eficiência de coleta da massa seca. Para a secagem, o ciclone separador mostrou o potencial para a redução da umidade do minério. A menor porcentagem de redução da umidade do minério coletado no *underflow* foi de 66,7% em relação ao alimentado. Por fim, o alimentador do tipo haste proposto surge como uma alternativa para a alimentação de materiais pegajosos como o minério úmido, embora necessite de adaptações para a automação e de testes experimentais para a definição das condições ótimas de operação.

NOMENCLATURA

A_p	Área da projetada da partícula [mm ²]
A_T	Área transversal da tubulação de escoamento de ar [cm ²]
b.u.	Base úmida [g _{água} · g _{sólido úmido} ⁻¹]
Cir	Circularidade da partícula [-]
D_p	Diâmetro de partícula [mm]
g	Aceleração da gravidade [cm ² · s ⁻¹]
HR	Índice de Hausner [-]
\dot{m}_p	Vazão mássica de sólidos [g · s ⁻¹]
Re	Número de Reynolds [-]
RU	Redução da umidade [-]
v_c	Velocidade de <i>choking</i> [cm/s]
v_s	Velocidade de <i>saltation</i> [cm · s ⁻¹]
v_T	Velocidade terminal da partícula [cm · s ⁻¹]
X_{bs}	Umidade em base seca [g _{água} · g _{sólido seco} ⁻¹]
X_{bu}	Umidade em base úmida [g _{água} · g _{sólido úmido} ⁻¹]
ϕ	Esfericidade da partícula [-]
ϵ_c	Porosidade na condição de <i>choking</i> [-]
η_{coleta}	Eficiência de coleta da massa seca no <i>underflow</i> do ciclone [-]
μ	Viscosidade dinâmica do ar [g · cm ⁻¹ · s ⁻¹]
ρ_{bc}	Densidade bulk compactada [g · cm ⁻³]
ρ_{ba}	Densidade bulk aerada [g · cm ⁻³]

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e a CAPES pelo suporte financeiro ao projeto de doutorado, processo 140614/2021-4.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, E. C., GELDART, D. (1999). The use of bulk density measurements as flowability indicators. In Powder Technology (Vol. 102).
- CHAVES, A. P. (2012). Manuseio de sólidos granulados. Teoria e prática do tratamento de minérios, v. 5. Oficina de Textos, São Paulo.
- COELHO, R. M. L. E MASSARANI, G. (1996). Fluidodinâmica de Partículas: Ainda sobre Correlações em Base aos Dados Experimentais de Pettyjohn e Christiansen - Relatório LSP/COPE. Citado por: MASSARANI G. (2002). Fluidodinâmica em Sistemas Particulados, 2ª ed. e-papers, Rio de Janeiro.
- CREMASCO, M. A. (2018). Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. 3ª ed. Editora Blucher, São Paulo.
- GRIMM, A., ELUSTONDO, D., MÄKELÄ, M., SEGERSTRÖM, M., KALÉN, G., FRAIKIN, L., LÉONARD, A., LARSSON, S. H. (2017). Drying recycled fiber rejects in a bench-scale cyclone: Influence of device geometry and operational parameters on drying mechanisms. *Fuel Processing Technology*, 167(August), 631–640. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.08.004>
- HOLMES, R. J., LU, L. (2015). Introduction: overview of the global iron ore industry. In Iron Ore (pp. 1–42). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-156-6.00001-0>
- LEUNG, L. S., WILES, R. J., NICKLIN, D. J. (1971). Correlation for Predicting Choking Flowrates in Vertical Pneumatic Conveying. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 10(2), 183–189. <https://doi.org/10.1021/i260038a008>
- MATSEN, J. M. (1982). Mechanisms of Choking and Entrainment. In Powder Technology (Vol. 32).
- MOLNÁR, K. (2006). Experimental Techniques in Drying (Chapter 2). In: A. S MUJUMDAR, Handbook of Industrial Drying, 3ª ed. Taylor & Francis Group LLC.
- OLIVEIRA, L. F., CORREA, J. L. G., TOSATO, P. G., BORGES, S. V., ALVES, J. G. L. F., FONSECA, B. E. (2011). Sugarcane bagasse drying in a cyclone: Influence of device geometry and operational parameters. *Drying Technology*, 29(8), 946–952. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.562062>
- PUNWANI, D. V. MODI, M. V. TARMAN, P. B. (1976). Generalized correlation for estimating choking velocity in vertical solids transport.
- ROCHA, T. A. F. (2019). CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DA SECAGEM DA BORRA DE CAFÉ EM LEITO VIBROFLUIDIZADO. Universidade Federal de São Carlos – Dissertação de Mestrado em Engenharia Química.
- ROCHA, T. A. F. (2022). A influência do processo de secagem de borra de café para a produção de biocombustíveis sólidos. Universidade Federal de São Carlos. Exame de qualificação de nível doutorado em Engenharia Química.
- SOUZA, A. S. (2022). SECAGEM CONVECTIVA DO MINÉRIO DE FERRO: ABORDAGEM EXPERIMENTAL E SIMULAÇÕES POR FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL. Exame de qualificação de nível doutorado em Engenharia Química.
- 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*, <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1747073>
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (2020). Mineral Commodity Summaries. Iron Ore Data Sheet - Mineral Commodity Summaries 2020, Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/iron-ore-statistics-and-information>.
- YANG, W.C. (1975). A mathematical definition of choking phenomenon and a mathematical model for predicting choking velocity and choking voidage. *AIChE Journal*, 21(5), 1013–1015. <https://doi.org/10.1002/aic.690210526>
- YOUSFI, Y. GAU, G. (1974). Aerodynamique de l'écoulement vertical de suspensions concentrees gaz-solides. Regimes d'écoulement et stabilité aerodynamique, *Chem. Eng. Sci.* 29 1939–1956.