



## **ANÁLISE POR CFD DA FLUIDODINÂMICA DE UM CHUTE DE TRANSFERÊNCIA ADAPTADO PARA SECAGEM DE MINÉRIO DE FERRO**

AMARILIS S. SOUZA<sup>1\*</sup>, THIAGO F. PÁDUA<sup>1</sup>, ALFREDO M. SARKIS<sup>2</sup>, THIAGO C. SOUZA  
PINTO<sup>3</sup>, RODRIGO BÉTTEGA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico Vale

<sup>3</sup>Centro de Desenvolvimento Mineral

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

**RESUMO** – Uma tecnologia inovadora para o beneficiamento do minério de ferro, recentemente patenteada pela empresa Vale S.A. visa adaptar um chute de transferência para operar como secador convectivo. Por se tratar de um novo processo, aspectos do funcionamento deste equipamento ainda requerem investigação. O objetivo deste trabalho foi analisar por CFD a fluidodinâmica de um chute de transferência adaptado para a secagem de minério de ferro, utilizando o modelo Euleriano Granular. Para descrever o escoamento multifásico na região que compreende a peneira do chute, foi utilizado o esquema de zona porosa, utilizando o *software* Fluent. Os resultados das simulações indicaram a velocidade do ar na faixa entre 5 e 18 m/s na região da peneira. Nas posições abaixo dela, próximas à região de entrada do ar, a velocidade pode chegar até 35 m/s, o que implica em uma região dentro do chute na qual há elevado potencial para secagem, quebra de aglomerados de partículas e arraste de material particulado. As simulações apresentaram adequada representação qualitativa do escoamento multifásico no chute e podem contribuir para melhorias na operação e geometria desse secador.

### **INTRODUÇÃO**

A escolha de um secador apropriado para atender as demandas de redução de umidade que considere o elevado consumo energético para a secagem em uma mineradora apresenta um grande desafio para esse setor. É importante observar que o valor desejado para a umidade do minério de ferro pode variar de acordo com a distribuição granulométrica (MOREIRA *et al.*, 2020) e a composição mineralógica do material (FERREIRA; PEREIRA; LIMA, 2019; MUNRO; MOHAJERANI, 2014). Sendo assim, a umidade apropriada para certas variedades de minério de ferro não é atingida somente por meio da remoção mecânica de água. Nesses casos, a secagem térmica é uma alternativa interessante para que o minério atinja a umidade desejada.

Os principais problemas para a implementação e escolha de secadores convectivos para o minério de ferro na indústria mineral estão relacionados à larga escala de produção desse setor. Como as linhas de processamento variam de centenas até milhares de toneladas de minério por hora, alterações no *layout* das plantas de processamento são particularmente desafiadoras, já que é necessária a instalação de equipamentos de elevada dimensão ou de vários processos em paralelo, cuja entrada e saída de material deve estar em série com os transportadores de correia. Assim, a alteração no fluxograma do processo para implementação de novos equipamentos requer espaço físico disponível, bem como longas paradas nas linhas de transporte (SOUZA PINTO *et al.*, 2015). Portanto, a busca por novas tecnologias de secagem vai ao encontro das necessidades do setor de mineração (WU *et al.*, 2010).

No ano de 2015 foi concedida uma patente a empresa Vale S.A. (SOUZA PINTO *et al.*, 2015) que apresenta um processo visando à secagem de minérios em chutes de transferência. O chute corresponde a um equipamento instalado no processo, no qual ocorre a queda do material sólido de um transportador de correia para outro, realizando assim a mudança na direção de transporte do minério. Uma aplicação dessa patente foi desenvolvida no chute original da planta de pelletização de São Luís/MA (Figura 1). No equipamento original, o minério segue pelo transportador de correia superior, cai em uma peneira e é encaminhado para o transportador inferior. No chute modificado, é introduzida uma corrente de ar seco na base do chute, que troca calor e massa com o material que cai. O

minério que atravessa a peneira segue para um transportador de correia inferior. Os sólidos elutriados são coletados em um sistema de tratamento de particulado fino. Tal processo é vantajoso tendo em vista o procedimento de instalação e operação, já que a secagem ocorre em um equipamento cuja linha de transporte de minério já está instalada. Ou seja, são necessárias somente adaptações da linha existente. No entanto, por se tratar de uma tecnologia nova, vários aspectos de seu funcionamento ainda requerem investigação. Assim sendo, estudos que analisem o escoamento multifásico no interior do chute podem contribuir para avaliar seu potencial de secagem e para propor possíveis melhorias de projeto ou operacionais.

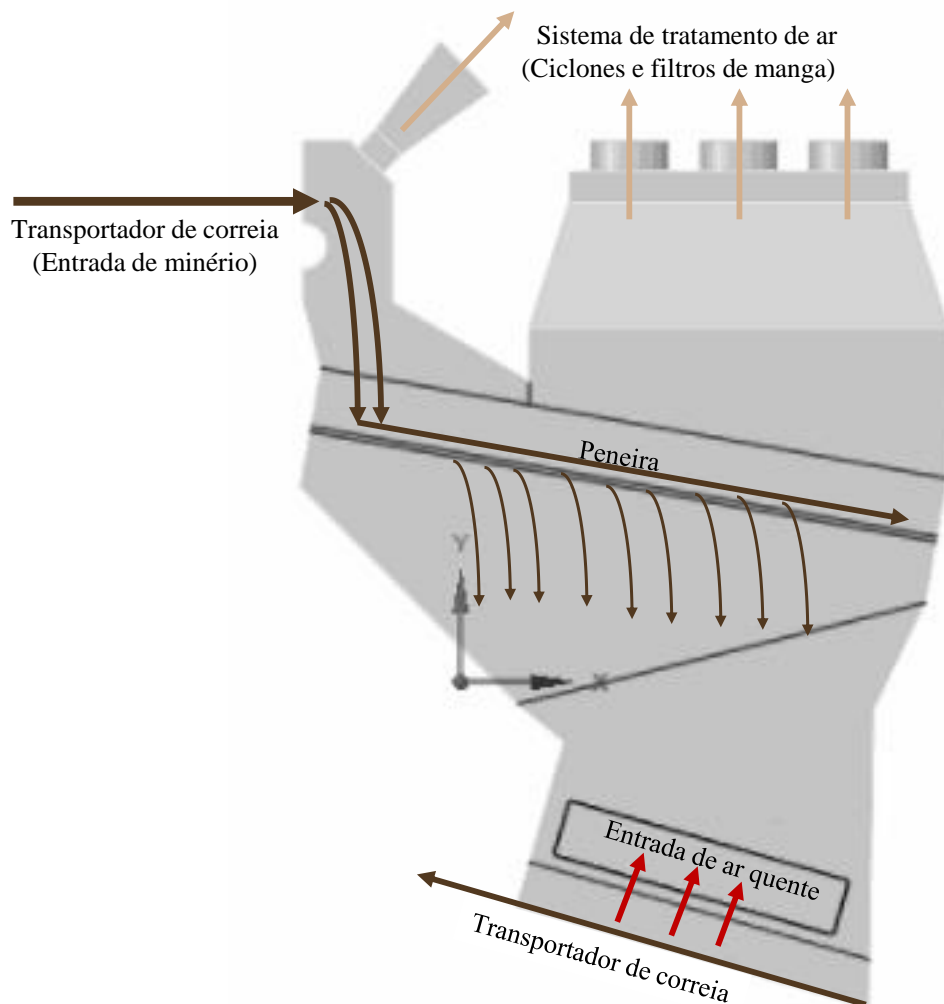


Figura 1: Desenho esquemático do sistema de secagem em chute de transferência – Planta de pelletização de São Luís/MA.

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) utiliza um conjunto de metodologias e ferramentas numéricas com a finalidade de simular processos que apresentam escoamento e analisar os resultados obtidos. A CFD tem contribuído para a compreensão dos fenômenos de transferência em diversos equipamentos da indústria química. Portanto, é uma poderosa ferramenta de projeto e análise de processos (LOPES, 2012; SOUZA *et al.*, 2018; TABIB *et al.* 2012).

O objetivo deste trabalho foi analisar por CFD a fluidodinâmica do equipamento de secagem em chute (SOUZA PINTO *et al.*, 2015), utilizando o modelo Euleriano Granular para simular a fluidodinâmica do escoamento multifásico. Foram analisados contornos inerentes ao escoamento multifásico no chute, que são de interesse para uma operação de secagem, tais como a posição das fases gasosa e sólida, bem como a velocidade do ar. No momento, houve somente a avaliação de resultados da fluidodinâmica no processo de secagem, uma vez que os fenômenos de transferência de calor e massa estão em fase de implementação.

As dimensões, geometria e parâmetros operacionais do chute simulado foram fornecidas pelo Instituto Tecnológico Vale (ITV) e se referem a um equipamento instalado e em fase de teste.

## MODELO MATEMÁTICO

Para descrever as fases fluida e sólida nas simulações, foi utilizado o modelo multifásico Euleriano Granular.

### Conservação da massa e do movimento

A equação da continuidade para as fases fluida ( $f$ ) e sólida ( $s$ ) é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (2)$$

$$\alpha_s + \alpha_f = 1 \quad (3)$$

Em que  $\alpha_q$ ,  $\rho_q$ , e  $\vec{v}_q$  são a fração volumétrica, densidade e velocidade da fase  $q$ , respectivamente. As frações volumétricas são funções contínuas no tempo e no espaço, cuja

soma é igual a um. Os balanços de momento para cada fase são dados pelas equações:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = -\alpha_f \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_f + \alpha_f \rho_f \vec{g} + K_{fs}(\vec{v}_f - \vec{v}_s) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} - K_{fs}(\vec{v}_f - \vec{v}_s) \quad (5)$$

Em que  $p$  é a pressão,  $p_s$  é a pressão dos sólidos,  $\bar{\tau}_q$  é o tensor das tensões viscosas da fase  $q$ , e  $K_{fs}$  coeficiente de troca de momento entre fases. O termo  $(\vec{v}_f - \vec{v}_s)$  indica a velocidade relativa entre as fases.

O tensor das tensões viscosas para cada fase é definido por:

$$\bar{\tau}_f = \alpha_f \mu_f (\nabla \vec{v}_f + \nabla \vec{v}_f^T) + \alpha_f (\lambda_f - \frac{2}{3} \mu_f) \nabla \cdot \vec{v}_f \bar{I} \quad (6)$$

$$\bar{\tau}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \alpha_s (\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{I} \quad (7)$$

Em que  $\mu_f$  é a viscosidade cisalhante do gás,  $\mu_s$  é a viscosidade cisalhante granular,  $\lambda_f$  é a viscosidade bulk do gás,  $\lambda_s$  é a viscosidade bulk granular e  $\bar{I}$  é o tensor unitário.

### Modelo de arraste

O coeficiente de troca de momento entre fases inclui o fator de arraste que, de acordo com o modelo de GIDASPOW *et al.* (1992), apresenta a forma:

$$K_{sf} = K_{fs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_f \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s} \alpha_f^{-2,65}, \quad \alpha_f > 0,8 \quad (8)$$

$$K_{sf} = K_{fs} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_f) \mu_f}{\alpha_f d_s^2} + 1,75 \frac{\alpha_s \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s}, \quad \alpha_f \leq 0,8 \quad (9)$$

Em que  $d_s$  é o diâmetro da partícula e  $C_D$  é o coeficiente de arraste, baseado no número relativo de Reynolds:

$$C_D = \frac{24}{\alpha_f Re_s} \left[ 1 + 0,15 (\alpha_f Re_s)^{0,687} \right] \quad (10)$$

$$Re_s = \frac{\rho_f d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{\mu_f} \quad (11)$$

### Teoria Cinética Granular

A equação do transporte segundo a Teoria Cinética Granular é representada por DING e GIDASPOW (1990):

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = (-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{fs} \quad (12)$$

Em que,  $k_{\theta_s}$  é o coeficiente de difusão da temperatura granular;  $\gamma_{\theta_s}$  é a dissipação de energia ocasionada pelas colisões e  $\phi_{fs}$  é a troca de energia entre a fase sólida e fluida. O termo  $(-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s$  é definido como a geração de energia pelo tensor tensão da fase sólida.

A equação de LUN *et al.* (1984) para a pressão dos sólidos ( $p_s$ ) apresenta termos para a cinética e para a colisão entre partículas:

$$p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s (1+e_{ss}) \alpha_s^2 g_0 \theta_s \quad (13)$$

Em que  $g_0$  é a função de distribuição radial e  $e_{ss}$  é o coeficiente de restituição sólido-sólido.

A função de distribuição radial ( $g_0$ ) foi da forma (OGAWA *et al.*, 1980):

$$g_0 = \left[ 1 - \left( \frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^3 \right]^{-1} \quad (14)$$

A difusão de energia é ( $k_{\theta_s}$ ) foi dada por (GIDASPOW *et al.*, 1982):

$$k_{\theta_s} = \frac{150 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{384 (1+e_{ss}) g_0} \left[ 1 + \frac{6}{5} \alpha_s g_0 (1+e_{ss}) \right]^2 + 2 \alpha_s^2 \rho_s d_s (1+e_{ss}) g_0 \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (15)$$

A dissipação de energia devido às colisões entre partículas é dada pela equação de LUN *et al.* (1984).

$$\gamma_{\theta_s} = \frac{12(1-e_{ss}^2)g_0}{d_s \sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s^2 \theta_s^{\frac{3}{2}} \quad (16)$$

A viscosidade *bulk* foi dada segundo LUN *et al.* (1984):

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_0 (1+e_s) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

A viscosidade cisalhante para a fase sólida levou em conta os termos de colisão e cinético (GIDASPOW *et al.*, 1992).

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_0 (1+e_{ss}) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$$\mu_{s,kin} = \frac{10 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{96 \alpha_s (1+e_{ss}) g_0} \left[ 1 + \frac{4}{5} g_{0,ss} \alpha_s (1+e_{ss}) \right]^2 \quad (19)$$

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Procedimento de simulação

O *software* Fluent versão 14.0 foi utilizado para a resolução das equações do modelo.

A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas dos materiais que foram adotadas nas simulações.

Tabela 1: Condições experimentais adotadas nas simulações.

Parâmetro	Descrição	Valor adotado nas simulações
	Fração	
$\alpha_{s,max}$	volumétrica de sólidos máxima	0,51
$d_s$ (m)	Diâmetro médio da partícula	0,006
$\rho_s$ (kg.m <sup>-3</sup> )	Massa específica do sólido	4220
$\rho_f$ (kg.m <sup>-3</sup> )	Massa específica do ar	0,84
$\mu_f$ (Pa.s)	Viscosidade do ar	1,7894 x 10 <sup>-5</sup>
$W_s$ (t/h)	Vazão mássica de sólidos	1200

Foram adotados os contornos descritos abaixo (MCILVENNA; MOSSAD, 2003):

- Condição de simetria no plano central (xy).
- Laterais do chute e placas defletoras: Parede, com condição de não deslizamento para a fase sólida e para a fase fluida.
- Entrada de sólidos: Entrada de sólidos com a fração volumétrica igual a  $\alpha_{s,max}$ .
- Entrada de ar: Entrada de ar na direção axial com perfil uniforme de velocidade.
- Transportadores de correia: condição de parede móvel, com velocidade linear prescrita igual a 4,5 m/s.

- Saídas: pressão atmosférica.

Nas simulações realizadas, o acoplamento pressão-velocidade foi feito pelo esquema SIMPLE. A discretização foi da forma *upwind* de 2ª ordem para o momento e 1ª ordem para a fração volumétrica e turbulência. Os critérios de convergência foram de  $1 \times 10^{-4}$  para a equação da continuidade e  $1 \times 10^{-3}$  para as demais equações. Os parâmetros de relaxação ficaram entre 0,2 e 1.

A malha computacional utilizada nas simulações era hexaédrica, com 535.158 células. Foi construída usando o software *Ansys Meshing*, disponível no pacote *Ansys Student 2022 R1*.

### Representação da peneira como zona porosa

Para descrever o escoamento multifásico na região que compreende a peneira do chute, foi utilizado o esquema de zona porosa disponível no Fluent. Esse modelo pode ser usado para uma ampla variedade de problemas, incluindo escoamentos através de leitos empacotados, filtros e placas perfuradas. Quando esse modelo é empregado, é definida uma zona do domínio computacional na qual é empregado o modelo de meios porosos e a queda de pressão na região é determinada via parâmetros de entrada. Para modelar uma placa perfurada, a queda de pressão fica da forma:

$$\Delta p_i = - \sum_{j=1}^3 C_{2ij}' \left( \frac{1}{2} \rho v_j |v| \right) \quad (20)$$

$C_2'$  é o coeficiente de dissipação inercial.

De acordo com o projeto original do chute, a peneira possui essencialmente duas regiões (Figura 2). A primeira região (Tela 1) é delimitada pela área de choque direto do minério com a tela. A segunda região (Tela 2) compreende o restante da peneira. Para permitir a distribuição e deslizamento do minério pela tela, possibilitando maior contato entre as fases, a primeira região possui área de abertura dos furos aproximadamente 66% menor que a da segunda. Assim sendo, essas duas regiões foram separadas nas simulações, considerando zonas porosas distintas, para aplicar os parâmetros adequados para a representação de cada tela.

### Forma de apresentação dos resultados

Para fins de apresentação e visualização dos contornos e vetores obtidos nas simulações, foram realizados dois cortes na geometria do equipamento em diferentes posições, conforme mostra a Figura 3. O “Corte A” corresponde ao contorno de simetria utilizado.

Na etapa de fluidodinâmica, foi feita uma análise geral do escoamento multifásico dentro do chute por meio da avaliação dos contornos de fração volumétrica dos sólidos e velocidade da fase ar. Também foram observados os vetores de velocidade de cada uma das fases.

Foi empregado o tempo real final de simulação de  $t_f = 80$  s, após o qual foi observado o regime estacionário.

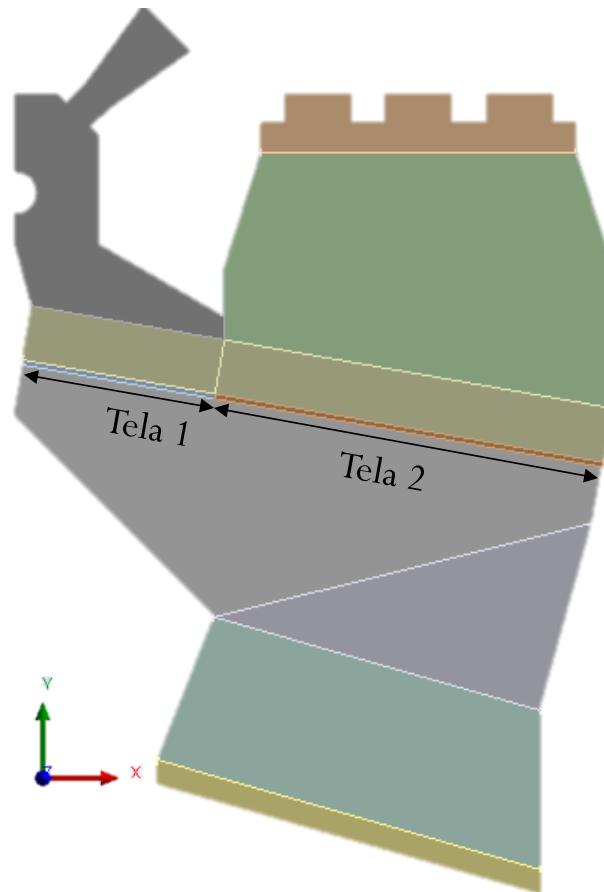


Figura 2: Localização das duas telas utilizadas na simulação da região da peneira.

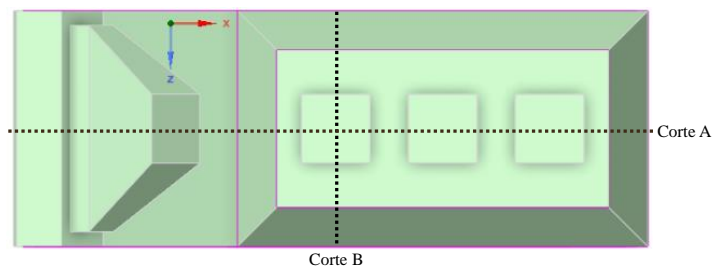


Figura 3: Vista superior do chute: localização dos cortes feitos na geometria do chute para apresentação dos resultados das simulações.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 apresenta os contornos de fração volumétrica de sólidos no interior do equipamento. Como há elevado gradiente de fração volumétrica de sólidos, é apresentada uma escala reduzida para melhor visualização da distribuição da fase sólida. É possível observar a entrada da fase sólida pela abertura na lateral do equipamento, sendo posteriormente conduzida pela parede móvel na região do transportador de correias superior. Em seguida, ocorre a queda e choque da fase sólida na região porosa (Tela 1), que interrompe a passagem de parte dos sólidos para a região

correspondente ao encaixe inferior da peneira. Observa-se que a fase sólida se distribui ao longo da zona porosa, sendo conduzida para a parte traseira do chute.

Na Figura 5 é apresentado o contorno de velocidade da fase fluida ao longo do eixo de simetria. Observa-se que na região da peneira o ar apresenta uma velocidade entre 5 e 18 m/s. Nas posições inferiores, próximas à região de entrada do ar, a velocidade pode chegar até 35 m/s.

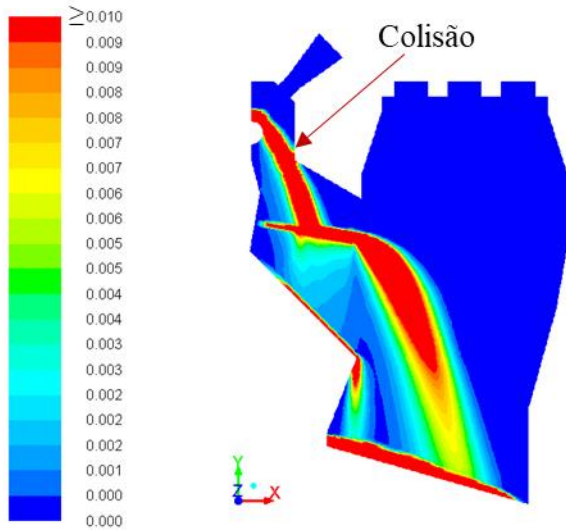


Figura 4: Contornos de fração volumétrica da fase sólida – Corte A.

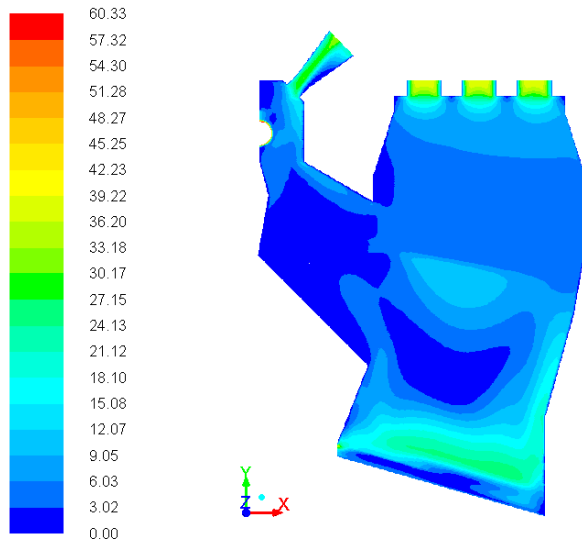


Figura 5: Contornos de velocidade da fase ar – Corte A.

Para melhor visualização da região de entrada do ar, tem-se os vetores de velocidade do ar no Corte B (Figura 6), no qual é possível observar detalhes do movimento do ar na região de entrada. As placas defletoras desviam a direção de escoamento para a parte superior do chute. Essas placas defletoras consistem em chapas retangulares posicionadas logo a frente da região de entrada de ar, utilizadas para fechar a abertura quando necessário. Ar a alta velocidade ascende na região central entre as defletoras, como também na região externa mais próxima à parede. Como essa região envolve os contornos de entrada de ar, as temperaturas do ar provavelmente serão elevadas nessa posição, indicando que na base do chute há grande potencial de secagem, bem como de quebra de aglomerados e arraste de material particulado.

Por meio dos resultados apresentados, é possível observar a complexidade fluidodinâmica existente na operação do chute adaptado para secagem. Tais resultados reforçam a necessidade de modelos apropriados para descrever a cinética de secagem no interior do equipamento, bem como a vantagem de se utilizar a CFD para estudo dos fenômenos de transporte que ali ocorrem.

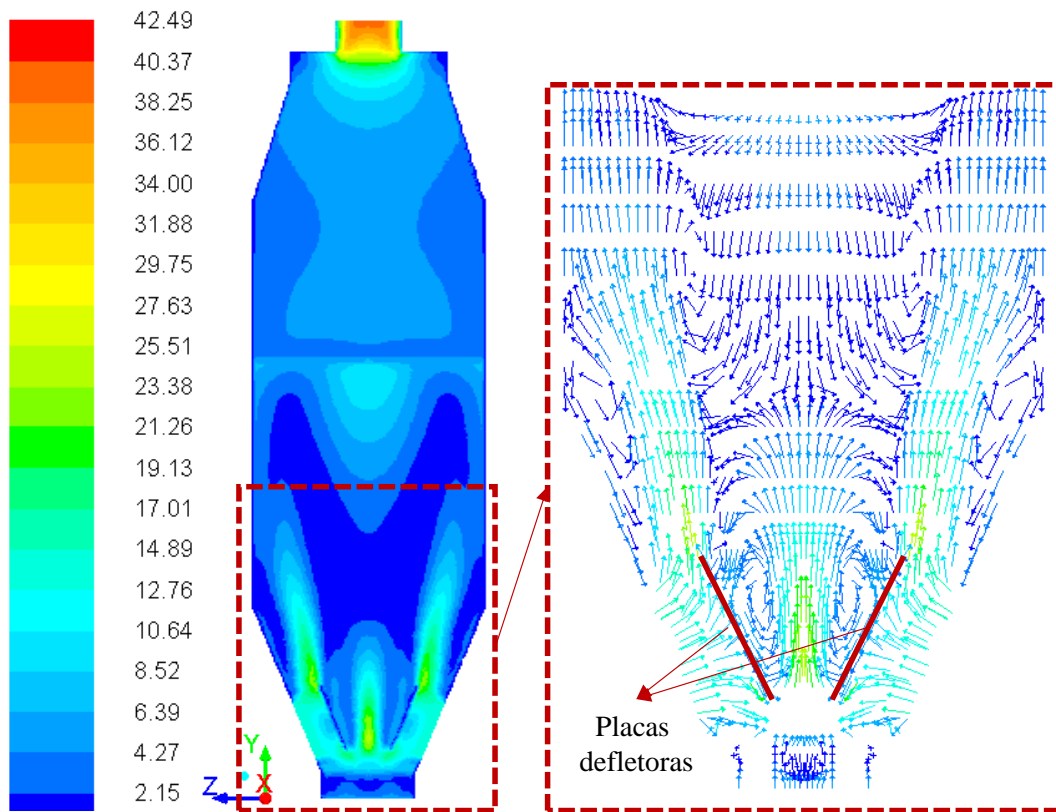


Figura 6: Contornos e vetores de velocidade do ar - Corte B.

Com base no escoamento multifásico predito pelo simulador, é possível apontar alguns aspectos da configuração do chute que requerem atenção. Na região de entrada de sólidos, na qual o transportador de correias superior descarrega o material dentro do chute, observa-se que há choque direto da fase sólida com a parede oposta. Em seguida, o minério cai e impacta diretamente a peneira, acumulando-se sobre ela e depois sendo distribuído. Nessas regiões há alta velocidade da fase sólida, o que torna o material das paredes particularmente susceptível ao desgaste (ILIC, 2019).

De acordo com os resultados das simulações, o ar com maior velocidade se encontra na região abaixo da tela 2. Assim sendo, favorecer a distribuição do minério ao longo das telas, de modo que espalhe e alcance a região da tela 2 pode aumentar a eficiência desse secador.

As placas defletoras, localizadas próximas às entradas de ar, também afetam substancialmente a dinâmica do ar. Os resultados indicam que há uma região com altas velocidades do ar entre as defletoras, o que favorece a secagem do sólido. Além disso, com

essas defletoras posicionadas de forma perpendicular à direção do escoamento do ar, este ascende mais próximo às paredes do chute.

Embora resultados de testes em planta do chute adaptado para secagem sejam necessários para validar as respostas do simulador, os contornos apresentados indicaram coerência física do modelo e possibilitaram a análise detalhada do complexo escoamento multifásico que acontece no interior do chute.

## CONCLUSÃO

Resultados das simulações da fluidodinâmica do equipamento de secagem em chute apontaram alguns aspectos de sua configuração que requerem atenção, tais como o possível desgaste do material da parede na região de entrada de sólidos, a distribuição do minério ao longo da peneira para aumentar a eficiência de secagem, bem como a posição das placas defletoras, por entre as quais há uma região com altas velocidades do ar, o que pode favorecer a secagem do sólido nessa região.



A simulação por CFD do chute possibilitou conhecer com detalhes o escoamento multifásico que ocorre em seu interior. Simulações por CFD podem fornecer dados importantes para projeto, otimização e controle de secadores para a indústria mineral. No momento, os impactos da fluidodinâmica sobre a secagem foram inferidos, mas a modelagem da transferência de calor e de massa estão em implementação para uma avaliação mais direta do fenômeno.

## NOMENCLATURA

$A_f$	Área total de abertura da peneira [m <sup>2</sup> ]
$A_p$	Área total da peneira [m <sup>2</sup> ]
$d_p, d_s$	Diâmetro da partícula [m]
$e_{ss}$	Coefficiente de restituição sólido-sólido [-]
$g$	Aceleração gravitacional [m/s <sup>2</sup> ]
$g_0$	Função de distribuição radial
$k_{\theta_s}$	Coefficiente de difusão da temperatura granular [-]
$K_{fs}$	Coefficiente de troca de momento entre fases [kg/(m <sup>3</sup> .s)]
$p$	Pressão [N/m <sup>2</sup> ]
$p_s$	Pressão do sólido [N/m <sup>2</sup> ]
$Q$	Energia térmica fornecida ao sistema [J]
$Re_s$	Número relativo de Reynolds da fase sólida
$t'$	Espessura da peneira [m]
$t$	Tempo (s)
$\vec{v}$	Velocidade da fase [m/s]
$\Delta P$	Queda de pressão [Pa]

## Letras Gregas

$\alpha$	Fração volumétrica [-]
$\alpha_{s,máx}$	Fração volumétrica máxima da fase sólida [-]
$\varepsilon$	Dissipação da energia cinética turbulenta [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\gamma_{\theta_s}$	Dissipação de energia por efeitos de colisão [-]
$\theta_s$	Temperatura granular [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\lambda$	Viscosidade bulk [Pa.s]
$\mu$	Viscosidade dinâmica [Pa.s]
$\rho$	Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_r$	Densidade real [kg/m <sup>3</sup> ]
$\bar{\tau}$	Tensor das tensões viscosas [N/m <sup>2</sup> ]
$\bar{\tau}''$	Tensor de Reynolds [N/m <sup>2</sup> ]

$\phi_{fs}$  Troca de energia entre a fase fluida e particulada [-]

## REFERÊNCIAS

- DING, J.; GIDASPOW, D. A (1990), Bubbling Fluidization Model Using Kinetic Theory of Granular Flow. *AICHE Journal*, v. 36, n. 4, p. 523–538.
- FERREIRA, R. F.; PEREIRA, T. M.; LIMA, R. M. F. (2019), A model for estimating the PFD80 transportable moisture limit of iron ore fines. *Powder Technology*, v. 345, p. 329–337.
- GIDASPOW, D.; BEZBURUAH, R.; DING, J. (1992), Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach, Fluidization VII. 1992, New York, p. 75–82.
- ILIC, D. (2019), Development of design criteria for reducing wear in iron ore transfer chutes. *Wear*, v. 434–435, p. 1–13.
- LOPES, G.C. (2012). Estudo computacional da dinâmica do escoamento reativo em risers industriais de FCC. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. Campinas, 129p.
- LUN, C. K. K.; SAVAGE, S. B.; JEFFREY, D. J.; CHEPURNIY, N. (1984), Kinetic Theories for Granular Flow: inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in General Flow Field. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 140, p. 223–256.
- MCILVENNA, P.; MOSSAD, R. (2003), Two Dimensional Transfer Chute Analysis Using a Continuum Method. Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, p. 547–552.
- 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 (ICH2014), p.1-8.
- OGAWA, S.; UMEMURA, A.; OSHIMA, N. (1980), On the equations of fully fluidized granular materials. *Zeitschrift*

- für angewandte Mathematik und Physik  
ZAMP, v. 31, n. 4, p. 483–493.
- SOUZA, A.S.; FREIRE, J.T.; BÉTTEGA, R.  
(2018), Computational Fluid Dynamics  
Evaluation of the Influence of Cone  
Geometry on Solids Circulation in  
Spouted Beds. *Drying Technology*, v. 57,  
p. 13876-13888.
- 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.
- TABIB, M.V.; LANE, G.; YANG, W.;  
SCHWARZ, M.P. (2012), CFD study of  
single phase and multiphase (liquid-  
liquid) pump-mixer: Analyzing design  
parameters, flow structures and  
turbulence. *Chemical Engineering  
Science*, v. 80, p. 55-69.
- 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.