

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE AR EM UM SILO DE SECAGEM DE MINÉRIO<sup>1</sup>

André Carlos Contin<sup>2</sup>

Rafael Motta Neiva<sup>3</sup>

Bayard Beling Morales<sup>2</sup>

Leonardo Barboza Trindade<sup>4</sup>

Antônio Cezar Faria Vilela<sup>5</sup>

## Resumo

O minério de ferro extraído do solo encontra-se naturalmente úmido devido à ação do clima e exposição ao ambiente. Essa umidade aumenta sua capacidade calorífica, tornando-se necessária uma maior energia para reduzi-lo, além de dificultar a separação dos finos no processo de peneiramento e, conseqüentemente, diminuindo a permeabilidade gasosa dentro do alto-forno. Para minimizar tais dificuldades, o minério pode ser submetido a um processo de secagem no silo, onde o mesmo é depositado, e ar quente é insuflado através de diversos bocais, promovendo a remoção da umidade. O presente trabalho pretende avaliar o funcionamento deste tipo de equipamento através da simulação numérica do escoamento de ar no seu interior. Foi construída uma geometria tridimensional do silo e resolvido numericamente o escoamento empregando o método dos volumes finitos. Foi considerada também a troca térmica entre o ar e o minério. As simulações foram realizadas avaliando diferentes vazões e temperaturas para o ar insuflado. Como resultado, conseguiu-se observar e caracterizar o comportamento do escoamento e da temperatura em função do tempo.

**Palavras-chave:** Secagem; Simulação numérica de fluídos; Minério de ferro.

## NUMERICAL SIMULATION OF AIR FLOW IN A DRY SILO IRON ORE

### Abstract

The iron ore extracted from the soil is naturally wet due the climate and environmental exposure. This moisture increases the ore heat capacity, making necessary a larger energy to reduce it, and difficult the separation of fines in the screening process and, consequently, decreasing the gas permeability in the blast furnace. To minimize these difficulties, the ore may be dried in a silo, where it is deposited and hot air blown through several nozzles, promoting the removal of moisture. The present work intends to analyze working mechanism of this equipment through the numerical simulation of air flow inside. A three-dimensional geometry of the silo was built and the flow was solved numerically using the finite volume method. It was also considered the heat exchange between air and the ore, and it calculates the water content. The simulation was conducted with different flows and temperatures for the air blown. As results, we were able to observe the behavior of the flow and temperature as a function of time.

**Key words:** Simulation; Drying; CFD; Iron ore.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

<sup>2</sup> Físico, Mestre em Engenharia Metalúrgica PPGEM/UFRGS – Equipe Técnica – STE.

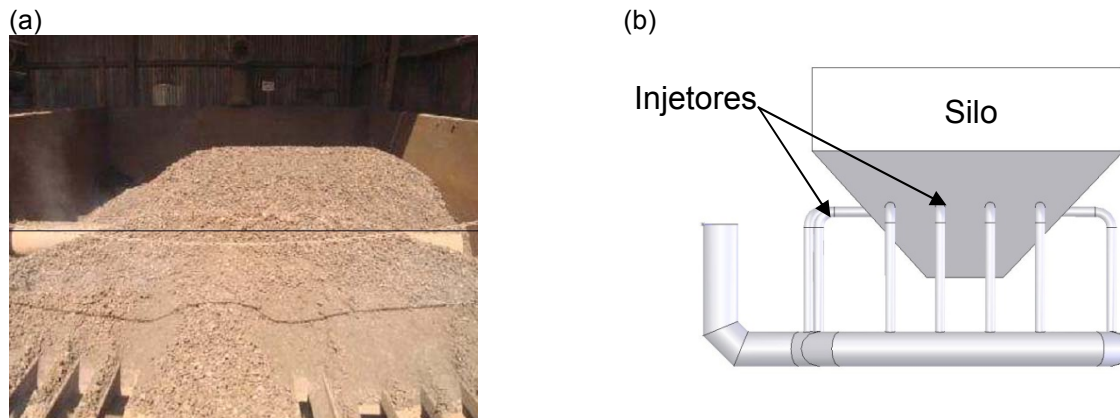
<sup>3</sup> Engenheiro Químico – Gerência de Matérias-Primas e Produção de Ferro-Gusa – V&M do Brasil.

<sup>4</sup> Físico, Dr. Eng. Metalúrgica – Diretor Geral – Science, Technology & Engineering – STE.

<sup>5</sup> Eng. Metalúrgico, Dr.-Ing, Professor do DEMET/PPGEM/UFRGS, Coordenador do LASID.

## 1 INTRODUÇÃO

Antes do minério de ferro ser carregado no alto-forno para ser transformado em ferro-gusa, é realizado a secagem desse insumo por meio de silos de secagem (Figura 1a). Nesses silos é injetado ar quente proveniente da chaminé dos Glendons por meio de injetores (Figura 1b). O ar quente transfere calor para o minério, promovendo a evaporação da água. Além disso, ar injetado provoca diminuição da pressão de vapor colaborando com o processo de secagem.



**Figura 1.** (a) Superfície do silo de secagem de minério; (b) vista lateral do silo com a tubulação de injeção de ar quente

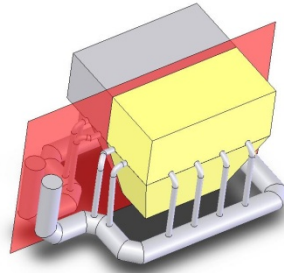
Este trabalho tem como objetivo caracterizar o escoamento do ar injetado dentro do silo de secagem através de um modelo numérico. Buscou-se, também, avaliar a relação entre a temperatura média do minério variando a vazão e temperatura do ar soprado. Foram simuladas quatro condições de operação distintas.

## 2 METODOLOGIA

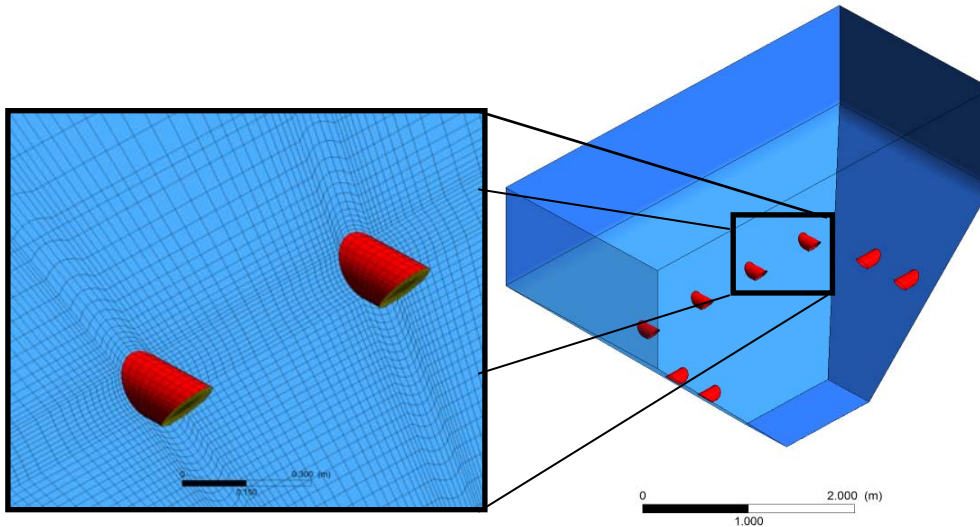
O modelo matemático que rege os fenômenos físicos considerados baseia-se no conjunto das equações de conservação de momento, massa e energia. Sua solução numérica foi realizada através de um pacote numérico que utiliza o método dos volumes finitos baseado em elementos.<sup>(1)</sup>

Construiu-se uma geometria tridimensional do silo de secagem, com base nos desenhos da planta. Observando que o equipamento é simétrico, foi considerada apenas a metade da geometria para a simulação (Figura 2a). A discretização do domínio foi feita usando uma malha hexaédrica de aproximadamente 100 mil nós. A distribuição dos nós foi realizada de modo a priorizar a região de saída dos injetores (Figura 2b).

(a)

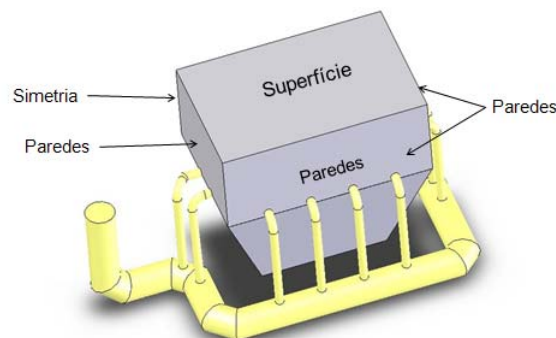


(b)



**Figura 2.** (a) Plano de simetria do silo de secagem; (b) malha e geometria do silo de secagem de minério.

Na modelagem matemática do fenômeno, considera-se que o minério consiste de um meio poroso isotrópico através do qual o ar quente injetado flui pelos injetores e sai pelo topo do silo (superfície). Na Figura 3, as regiões que delimitam o domínio da simulação são ilustradas.



**Figura 3.** Vista isométrica do silo de secagem de minério com a tubulação dos injetores (em amarelo).

As seguintes hipóteses foram tomadas para a realização da modelagem:

- o minério foi assumido como esferas de diâmetro fixo e uniforme (7 mm);
- as paredes são adiabáticas: ar e minério não perdem calor através das paredes do domínio;
- considerou-se um meio poroso isotrópico, ou seja, o escoamento não tem caminhos preferenciais;
- a transferência de calor no sistema é somente convectiva – a condução de calor através do minério foi considerada desprezível;<sup>(2)</sup>
- as propriedades físicas do ar e do minério são consideradas constantes dentro do silo durante o processo; e
- o escoamento está em regime estacionário.

As condições de contorno para as equações da energia do gás e do minério são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Condições de contorno para as equações de energia para cada fase

Regiões	Gás	Minério
Paredes	Adiabáticas	Adiabáticas
Superfície	Adiabática	Fluxo de calor convectivo

Foram simuladas quatro condições operacionais, com diferentes vazões e temperaturas de sopro (Tabela 2).

**Tabela 2.** Condições simuladas

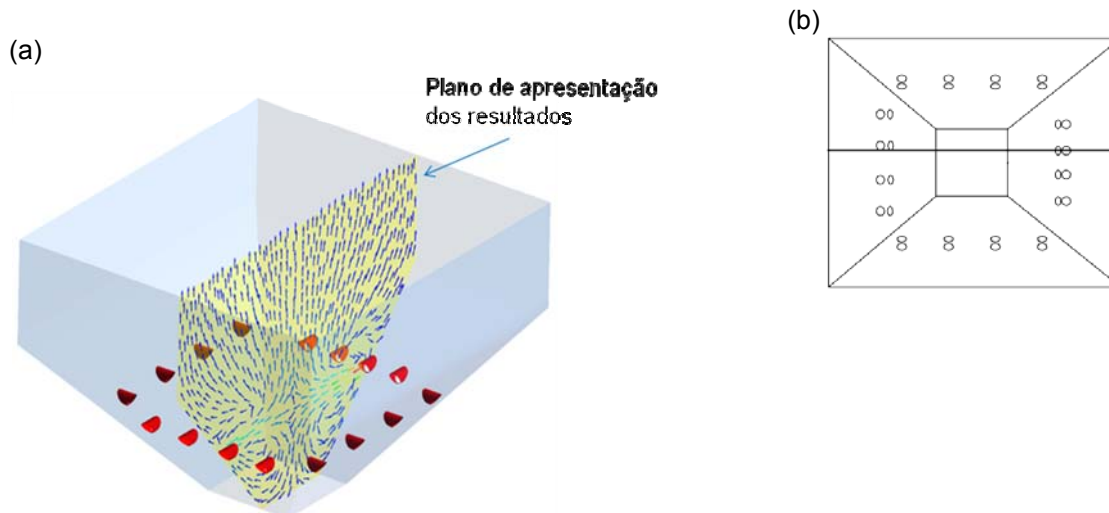
Injeção de ar		
Condição de entrada	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura (°C)
Caso 1	11.600	110
Caso 2	17.400	110
Caso 3	11.600	145
Caso 4	17.400	145

O procedimento de solução numérica adotado inicia com a solução do escoamento gás-sólido, sem considerar a transferência de calor. Após a obtenção dessa solução, a equação da conservação de energia é ativada – em regime transiente – e resolvida por um período de 5 horas, de acordo com a prática da usina. Considera-se que o minério está inicialmente à temperatura de 30°C.

O *software* empregado para resolver o problema numérico descrito acima é o Ansys CFX-11.0.<sup>(1)</sup> O critério de convergência utilizado para o sistema de foi de aproximadamente  $1,0 \times 10^{-4}$  RMS. Detalhes da formulação matemática em um meio poroso isotrópico com troca de calor pode ser visto no trabalho de Ljung.<sup>(3)</sup>

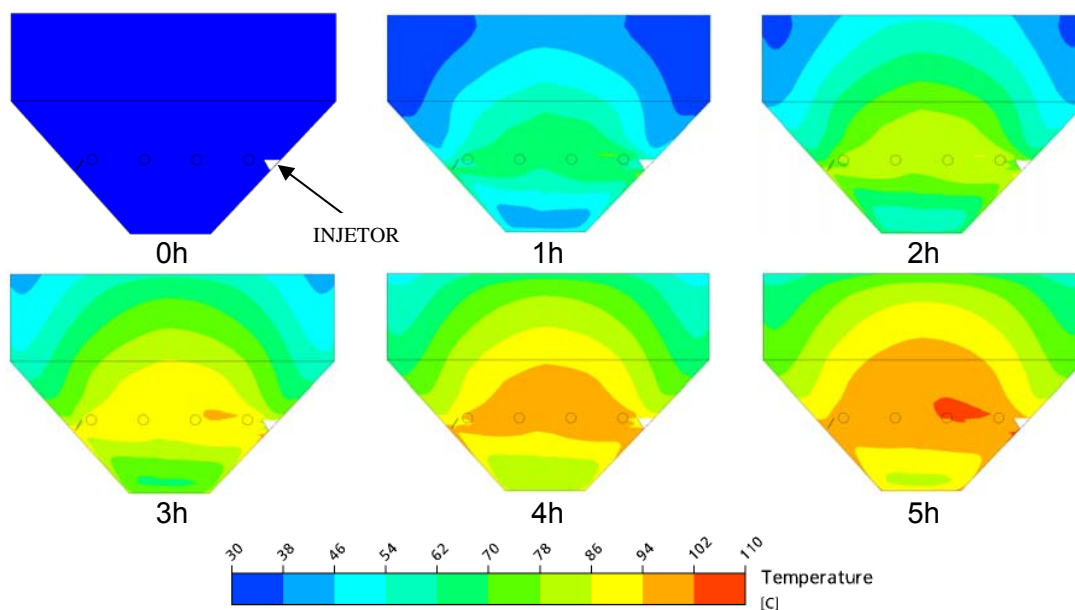
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os mapas de temperatura referem-se ao plano mostrado nas Figuras 4a e 4b. Esse plano foi escolhido de modo a cortar exatamente um dos injetores de ar quente.



**Figura 4.** (a) Plano de análise para os mapas de temperatura e concentração de água; (b) vista superior da posição do plano.

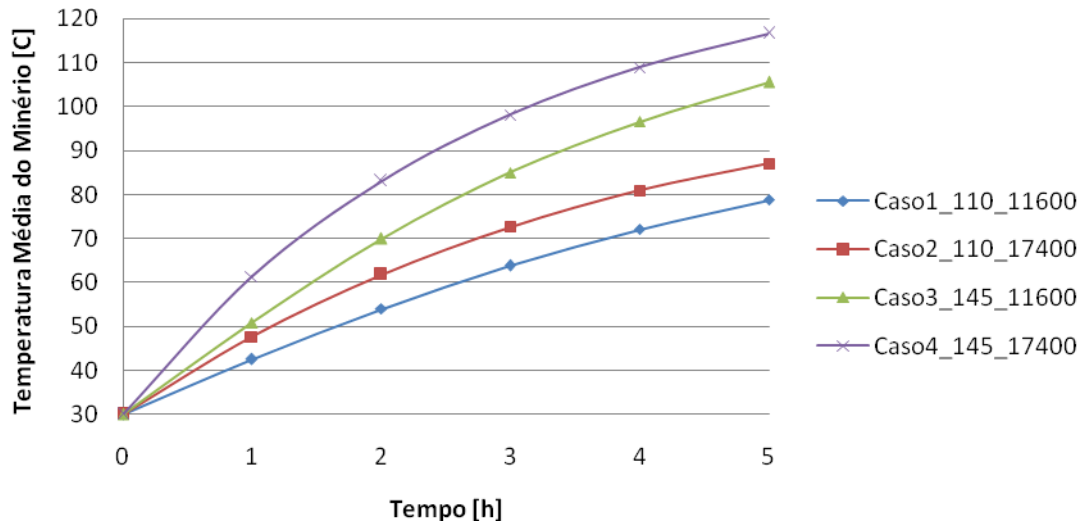
Pode-se observar (Figura 5), a distribuição da temperatura do minério no período de cinco horas para o caso 1. O aquecimento da carga de minério ocorre inicialmente no centro do silo e, à medida que o ar permeia o leito, a periferia vai se aquecendo. No entanto, mesmo após 5 horas de secagem verifica-se uma diferença de temperatura de até 30°C entre essas regiões. Ao final das cinco horas, observa-se que uma fração do minério localizado a frente dos injetores atinge a temperatura de 110°C.



**Figura 5.** Mapas de temperatura do minério durante cinco horas para o caso 1.

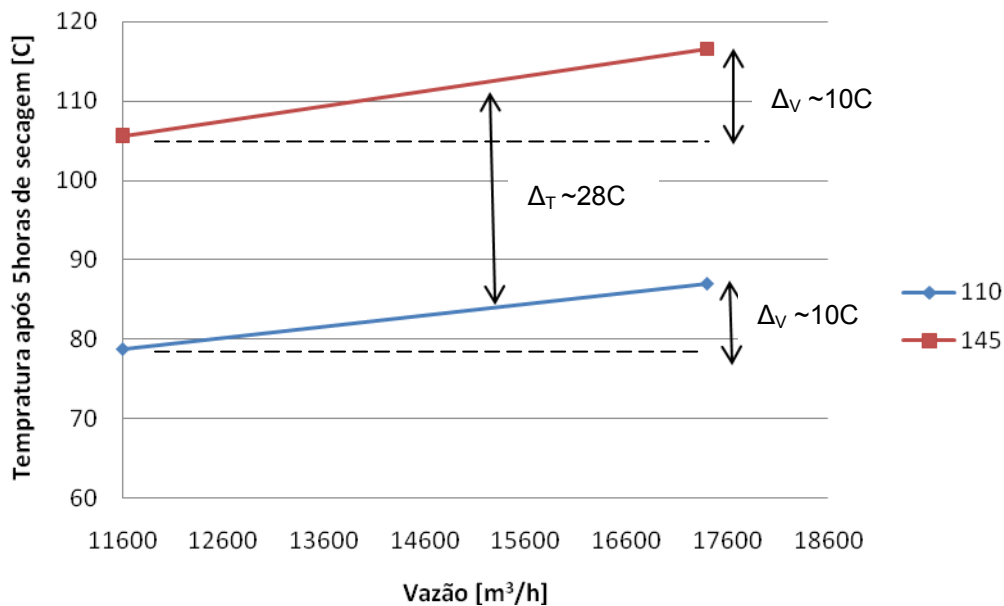
A temperatura média do minério em função do tempo para os quatro casos analisados dentro do silo pode ser visualizada na Figura 6. No início do processo de secagem a temperatura média da carga de minério sobe mais rapidamente. Ao final de cinco horas a temperatura média do minério começa a ter um caráter assintótico.





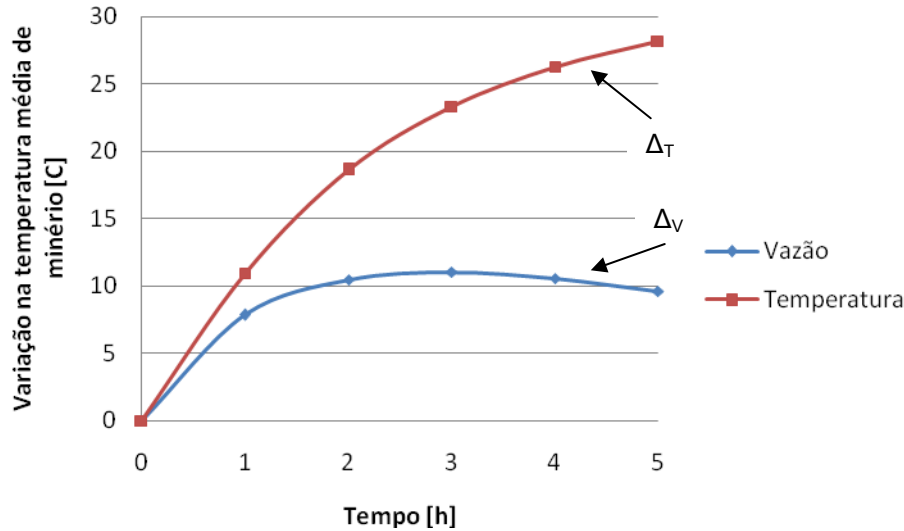
**Figura 6.** Temperatura média do minério durante 5 horas para os quatro casos analisados.

O efeito isolado do aumento da vazão injetada (de 11.600 m<sup>3</sup>/h para 17.400 m<sup>3</sup>/h) na temperatura média do minério após cinco horas de secagem foi de aproximadamente 10°C (Figura 7). Já o aumento da temperatura de injeção (de 110°C para 145°C), resultou num aumento de aproximadamente 28°C na temperatura média do minério.



**Figura 7.** Análise da influência da vazão injetada (11.600 m<sup>3</sup>/h e 17.400 m<sup>3</sup>/h) e temperatura (110°C e 145°C) após 5 horas.

Na Figura 8 é feita a mesma análise durante todo processo de secagem. Pode-se observar que no início a influência da temperatura e da vazão são bastante parecidas. Mas, à medida que ocorre a secagem, o efeito da temperatura torna-se mais importante que o efeito da vazão. Vale observar que o efeito da vazão não se altera significativamente durante todo processo, ao contrário do efeito da temperatura de injeção do gás.



**Figura 8.** Análise da influência da vazão injetada ( $11.600 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $17.400 \text{ m}^3/\text{h}$ ) e temperatura ( $110^\circ\text{C}$  e  $145^\circ\text{C}$ ) durante todo período de secagem.

## 4 CONCLUSÕES

Foi construído um modelo numérico do escoamento de ar em um silo de secagem, envolvendo troca de calor. Foram realizadas quatro simulações com o intuito de avaliar influência da temperatura do gás e da vazão injetada no perfil de temperatura do minério.

As seguintes conclusões foram obtidas destas simulações:

- observou-se que o minério é aquecido do centro para as laterais do silo, existindo um importante gradiente de temperatura no interior do mesmo. No entanto, acredita-se que alterações geometria do equipamento – em especial, no posicionamento dos injetores – poderia acarretar benefícios, proporcionando uma distribuição mais equilibrada da temperatura;
- a temperatura média do minério aumenta com maior velocidade no início do processo, mas ao final de cinco horas observa-se um comportamento assintótico da mesma, sugerindo regime estacionário; e
- a influência da temperatura de injeção de gás se mostrou maior frente à influência da vazão na temperatura média do minério.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a V&M do Brasil, em especial os Srs. Marcelo Almeida Cunha Ferreira e Paulo Miranda Gonçalves por viabilizarem a realização desse trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 Ansys Technology, CFX-11.0, Solver Manual, Harwell 2004.
- 2 BARATI, M. Dynamic simulation of pellet induration process in straight-grate system. International Journal of Mineral Processing [S.I.], v. 89, n. 1-4, p. 30-39, Dec 2008.
- 3 Ljung, A. L., "Drying of Iron Ore Pellets – Analysis with CFD". Licentiate Thesys. Luleå University of Technology. Department of Applied Physics and Mechanical Engineering. 2008.