

Análise do escoamento fluidodinâmico dos gases e do pré-aquecimento da sucata no interior de um forno de refino do aço do tipo EOF

Pedro Paulo Azevedo ^{1*} 

Leonardo Neves ¹ 

Resumo

No presente trabalho foi proposto um modelo matemático em escala real do escoamento gasoso e da troca térmica dos gases com a sucata no sistema de exaustão de um forno de energia otimizada no refino do aço (*Energy Optimizing Furnace* - EOF). A compreensão do comportamento dos gases de processo e do aproveitamento térmico para pré-aquecimento da sucata são fundamentais para análise de viabilidade do projeto do forno e continuidade do processo atual. Através da modelagem matemática foi analisado que a transferência de calor entre os gases e a sucata metálica no interior do forno depende principalmente do preparo prévio no pátio de sucata e controle das variáveis de processo do tamanho de sucata e compactação dos pacotes de sucata. Foi possível validar neste trabalho que através de comparação das medições realizadas no forno EOF com os resultados obtidos na simulação, que o modelo matemático é capaz de prever as variáveis de escoamento dos gases e pré-aquecimento da sucata durante o processo de produção de aço no forno.

Palavras-chave: Forno de Energia Otimizada; EOF; Pré-aquecimento de sucata; Modelagem matemática.

Analysis of the dynamic fluid flow of gases and the pre-heating of scrap inside an EOF steel refining furnace

Abstract

In this manuscript has proposed a full-scale mathematical model of the gas flow and heat transfer of gases with scrap in the exhaust system of an Energy Optimizing Furnace (EOF) in primary steelmaking. The understanding of the behavior of the process gases and the heat transferred to preheat the scrap is fundamental for the viability analysis of the furnace project and the continuity of the current process. Through mathematical modeling, it was analyzed that the heat transfer from the gases to the scrap metal inside the furnace depends mainly on prior scrap preparation and control of the process variables of scrap size and compaction of the scrap packages. It was possible to validate in this work that by comparing the measurements taken in the EOF furnace with the results obtained in the simulation, the mathematical model is capable of predicting the variables of gas flow and scrap preheating during the steelmaking process in the furnace.

Keywords: Energy Optimized Furnace; EOF; Metal scrap preheating; Mathematical Modeling.

1 Introdução

Com o intuito de realizar a fusão e refino associado com o pré-aquecimento da sucata metálica na produção do aço líquido foi desenvolvido em 1982 um novo processo como um dos experimentos tecnológicos da Korf Tecnologia Siderúrgica Ltda. segundo Pfeifer [1] e é denominado de EOF - Energy Optimizing Furnace (Forno de Energia Otimizada). A produção do aço líquido se dá pela injeção de oxigênio por lanças supersônicas e ventaneiras submersas, para oxidação e agitação do banho de aço líquido. Com o passar de mais de 30 anos de utilização do forno, várias

modificações em sua estrutura e parâmetros de processo foram ajustados para seu aperfeiçoamento e modernização. Devido a estas modificações, a qualidade do produto final e do processo produtivo foram alteradas e seus resultados podem não mais ser conforme o proposto do projeto inicial, necessitando de ajustes e modificações para melhorar seu desempenho e benefícios. O aproveitamento energético de calor dos gases residuais pela sucata metálica pode ser avaliado e confirmado através da modelagem matemática. As técnicas para simulação matemática do escoamento dos

¹Departamento de Manutenção, Gerdau Aços Longos, Ouro Branco, MG, Brasil.

*Autor correspondente: eng.azevedo@live.com



gases em fornos de refino primário são propostas por outros autores como Maia et al. [2] e Zerwas e Paiva [3] e estudos para o pré-aquecimento de sucata metálica são propostos por Mandal e Irons [4] e Arinka e Hassan [5]. No presente trabalho foi proposto uma análise das transferências de calor do fluxo gasoso no interior do forno com a sucata metálica, levando em consideração suas perdas térmicas com os elementos refrigerados e a velocidade dos gases no interior do forno. O melhor entendimento da atual situação do forno é necessário para tomada de decisões de continuidade do processo, estratégias de manutenção e produção no mesmo. Com a modelagem matemática do processo de pré-aquecimento da sucata metálica dentro do forno EOF foi possível validar com dados experimentais e compreender melhor o escoamento dos gases no interior do forno e os efeitos causados com a alteração das variáveis relacionadas ao processamento dos pacotes de sucata. Estudos do escoamento dos gases e pré-aquecimento da sucata no processo físico real possuem grande complexidade de análise e controle do ambiente do forno além do alto custo de simulação, riscos operacionais do processo e perda de produção da aciaria.

2 Metodologia

O forno EOF em questão opera com 2 ventaneiras para agitação do banho e 5 injetores supersônicos para oxidação do banho, injetando na faixa de 150 Nm³/min de oxigênio. Como matéria-prima na produção do aço, embora a versatilidade de proporções que o EOF abrange, usualmente é utilizado 80% de gusa líquido e 20% de carga sólida, sendo uma mescla de gusa sólido e sucata de aço mista. O tempo médio entre corridas é de 30 minutos com uma capacidade de produção de 40t de aço por corrida. Na Figura 1 pode-se observar uma representação do forno com a posição das ventaneiras, lanças supersônicas e região de pré-aquecimento de sucata.

As equações do escoamento fluidodinâmico turbulento para modelagem matemática incorporam as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e conservação de energia. A equação de continuidade pode ser expressa pela Equação 1:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Onde ρ = densidade do fluido (kg/m³), u = velocidade na direção x (m/s), v = velocidade na direção y (m/s), w = velocidade na direção z (m/s) e t = tempo (s).

O primeiro termo da Equação 1 representa a taxa de acumulação de massa por unidade de volume, os demais termos representam as taxas de transporte de massa por unidade de volume através do movimento nas direções x , y e z .

A equação de conservação de quantidade de movimento na direção x pode ser expressa pela Equação 2:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x \end{aligned} \quad (2)$$

Onde μ_{eff} = viscosidade efetiva (kg/m.s), P = pressão (Pa), g_x = aceleração da gravidade na direção x (m/s²). O primeiro termo da equação (2) representa a taxa de acumulo de quantidade de movimento por unidade de volume e os demais termos do lado esquerdo da equação representam as taxas de transporte de movimento por unidade de volume através do movimento nas direções x , y e z . Os três primeiros termos do lado direito da equação representam as taxas de transporte de quantidade de movimento por unidade de volume por difusão nas direções x , y e z , os demais termos do lado direito representam a força por unidade de volume atuando devido a pressão e o efeito da gravidade associado ao fenômeno de convecção natural. A equação de conservação de energia pode ser representada pela Expressão 3.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho Hv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho Hw)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_l}{Pr_l} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu_l}{Pr_l} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu_l}{Pr_l} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

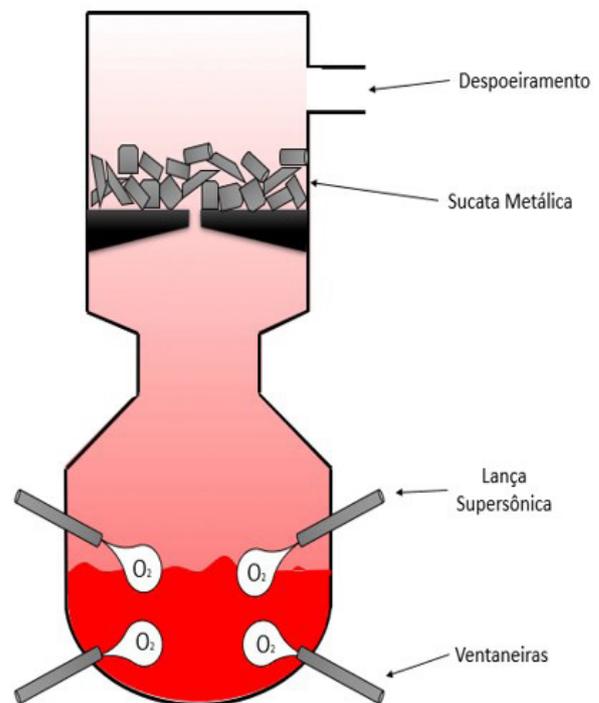


Figura 1. Representação forno EOF.

de H = entalpia (J/kg), μ_t = componente turbulenta da viscosidade (kg/m.s), μ_l = componente laminar da viscosidade (kg/m.s), P_{nt} = número de Prandtl turbulento, P_{nl} = número de Prandtl laminar. Na equação (3) o primeiro termo representa a taxa de acumulação de energia por unidade de volume e os termos restantes no lado esquerdo da expressão representam a taxa de transferência de energia devido ao movimento nas direções x , y e z . Os termos a direita da expressão representam a taxa de transferência de calor por unidade de volume por difusão nas direções x , y e z .

A sucata metálica no interior do forno foi representada como domínio de sistema poroso, com fração de vazio de 0,8 e 0,85 conforme representado nos estudos de Mandal e Irons [4]. O domínio poroso foi configurado com a permeabilidade e os valores de transferência de calor calculados através das Equações 4 e 5 respectivamente e o material sólido no domínio poroso é o aço.

$$P = \frac{f^3 \cdot d^2}{150 \cdot (1-f)^2} \quad (4)$$

$$h_{fs} = C \cdot \left(\frac{1}{2 + 1,1Pr^{0,3} Re^{0,6}} \right) \quad (5)$$

Onde: P = permeabilidade (Darcy); f = fração de vazio; d = diâmetro de partícula (m); C = Condutividade térmica efetiva do fluido (W/m.K); Pr = número de Prandtl; Re = número de Reynolds; h_{fs} = Coeficiente de transferência de calor fluido-sólido (W/m².K).

As características da sucata e do processamento em pátio de sucata que alimentam o EOF, como a fração de vazio, densidade dos pacotes, tipo de sucata e forma de processamento são compatíveis com as citadas no estudo de Mandal e Irons [4], desta forma neste trabalho é utilizado o diâmetro de partícula de 0,03m para cálculo da permeabilidade do sistema poroso.

Para modelagem da fase gasosa, foi utilizado o composto de gases CO, CO₂, N₂ e O₂, conforme amostrado na análise dos gases de saída do forno. A temperatura dos gases na saída

do banho foi inserida a 1150 °C e a massa de gás de entrada considerado de 15kg/s conforme calculado pela análise dos gases.

Para simulação da sucata foi utilizado um domínio poroso com fração de vazio de 0,8 e 0,85 e área interfacial por unidade de volume de vazio de 283m²/m³ e 212m²/m³ respectivamente.

Como o forno opera em ciclos e a sucata aquece apenas durante um ciclo de operação, as simulações foram realizadas em regime transiente considerando 12 minutos de operação do forno com um passo tempo de 2 segundos.

Medições de temperatura da superfície dos pacotes de sucata são possíveis para verificar e validar os resultados obtidos no modelo matemático, as medições de temperatura na aciaria são realizadas da parte superior do forno após o termino do ciclo de sopro de oxigênio. Desta forma, após finalizar o sopro de oxigênio e o pré-aquecimento da sucata metálica, abre-se a parte superior do forno onde se posiciona o cesto de carregamento de sucata e se realiza as medições utilizando uma câmera térmica modelo Fluke Ti400.

Na Tabela 1, pode-se observar as variáveis de entrada para modelagem matemática.

A malha numérica para simulação do modelo após estudo de independência foi do método tetraédrica com aproximadamente 1.400.000 elementos. Devido à complexidade do modelo e não foi possível otimizar o número de elementos da malha com a utilização de escala e simetrias no domínio do forno.

Os modelos foram simulados através do CFX no Ansys utilizado o modelo de turbulência K-epsilon e as simulações foram feitas no sistema de advecção upwind com dupla precisão. As condições de contorno assumidas são de escorregamento livre dos gases nas paredes do forno e no domínio poroso que representa a sucata metálica. O coeficiente de transferência de calor convectivo foi configurado com 16 W/m².K. Na saída para o duto do despoejamento foi considerado como pressão de abertura.

3 Resultados e discussões

A análise do fluxo dos gases no interior do forno se faz importante para determinar o aquecimento da carga de

Tabela 1. Variáveis de entrada para modelagem matemática

| Variável | Valor | Unidade |
|---|------------|--------------------------------|
| Gases de exaustão (65 °C) | 783 | m ³ /min |
| Injeção de O ₂ pelas ventaneiras (25 °C) | 150 | m ³ /min |
| Pressão negativa chaminé | -140 | kPa |
| Temperatura dos gases saída do banho | 1150 | °C |
| Vazão volumétrica de gás de entrada a 1150 °C | 917 | m ³ /min |
| Vazão mássica de gás de entrada | 15 | kg/s |
| Fração de vazio | 0,8 e 0,85 | - |
| Área interfacial por unidade de volume | 283 e 212 | m ² /m ³ |
| Diâmetro de partícula | 0,03 | m |
| Coeficiente de transferência de calor fluido-sólido | 16 | W/m ² .K |

sucata metálica uma vez que a velocidade e fluxo dos gases é proporcional ao coeficiente de transferência de calor entre o fluido (gás) e a carga sólida (sucata metálica). Na Figura 2 é possível verificar os vetores de velocidade dos gases no interior do forno para fração de vazio de 0,8 (a) e 0,85 (b). Quanto maior for a restrição de passagem dos gases na carga

de sucata metálica, maior será o fluxo de gases pelos dutos laterais do forno e menos homogênea será a temperatura da carga de sucata, o que acarretará em perda de energia no processo.

Na Figura 3 é possível verificar que a temperatura dos gases próximos ao duto de despeiramento está na ordem

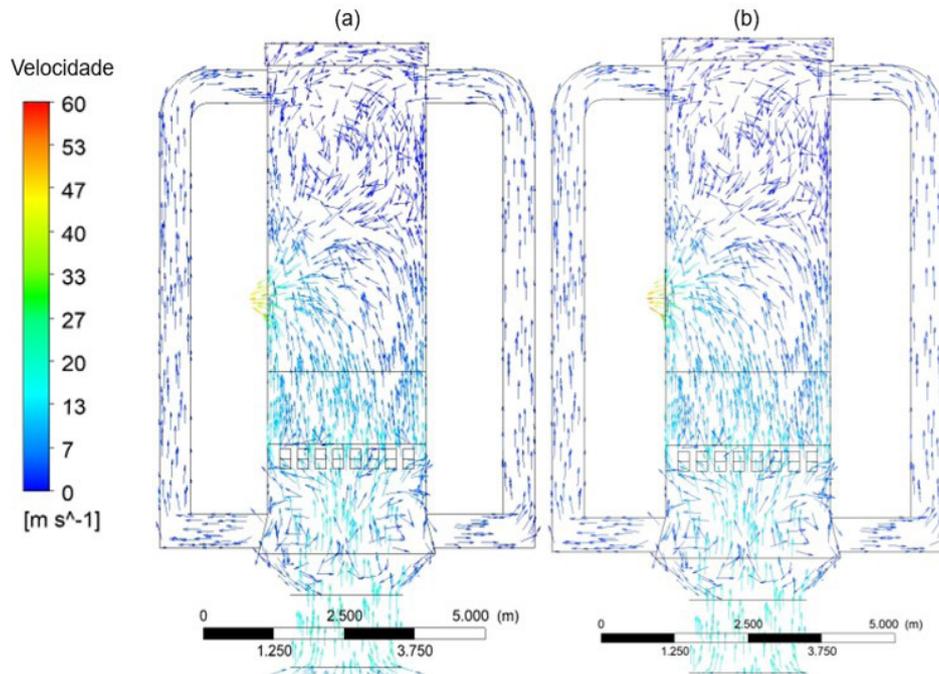


Figura 2. Vetores de velocidade dos gases no interior do EOF.

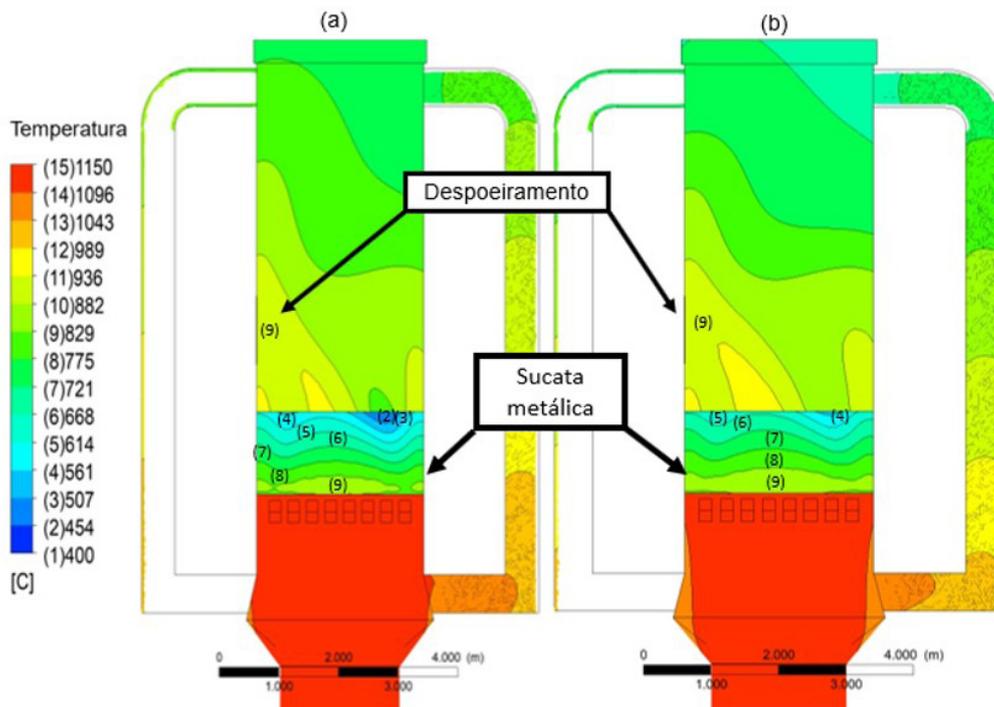


Figura 3. Perfil de temperatura no interior do forno.

de 830 °C. A sucata metálica que é carregada no forno em temperatura ambiente, ganha temperatura durante o período de sopro do forno atingindo a temperatura de 860 °C no ponto mais quente, local em contato com os garfos refrigerados. Analisando a fração de vazio de 0,8 Figura 3a e 0,85 Figura 3b é possível verificar principalmente uma homogeneidade de temperatura maior para 0,85 de fração de vazio. A escala de temperatura, entre máximas e mínimas são semelhantes. A parte inferior do pacote de sucata recebe o gás em maior temperatura e consequentemente tem maior troca térmica. À medida que os gases vão subindo no interior do pacote de sucata, a troca térmica diminui com a redução da variação de temperatura entre fluido e sólido.

Pode-se observar na Figura 4 a representação das temperaturas na superfície dos pacotes de sucata. As temperaturas variam entre 464 °C a 635 °C para 0,8 de fração de vazio (a) e 529 a 678 para 0,85 (b) de fração de vazio.

Na Figura 5 é possível verificar a distribuição da temperatura da sucata na superfície dos pacotes de sucata para 0,8 (a) e 0,85 (b) de fração de vazio.

Foram realizadas medições durante o processo para validar o modelo de temperatura. As medições ocorreram pela parte superior do forno, onde é posicionado o cestão de sucata, utilizando uma câmera térmica da Fluke modelo Ti400. Nas 10 medições realizadas após o ciclo completo de corrida da aciaria, foi obtido como valor médio na parte superior da sucata aquecida de 580 °C com desvio padrão de ±156 °C, sendo o menor valor encontrado de 390 °C e o maior valor em 820 °C. Medições pela parte inferior não são possíveis devido a geometria do forno e questões de segurança. Na Tabela 2, pode-se comparar as temperaturas

de sucata da parte superior dos pacotes para os dois modelos simulados com as medições realizadas na aciaria.

Os valores de temperatura da carga de sucata encontrados na simulação e nas medições na aciaria mostram que a superfície da sucata após o ciclo de pré-aquecimento atinge temperaturas médias de 580 °C para 0,8 de fração de vazio e 640 °C para 0,85 de fração de vazio. As medições realizadas na aciaria mostram um resultado de temperatura médio de 580 °C valor igual a simulação matemática para 0,8 de fração de vazio. Os valores de mínima de 390 °C e máxima de 820 °C podem ser explicados devido a uma formação ou empilhamento não homogêneo dos pacotes de sucata no interior do forno e falta de permeabilidade em determinada região da sucata. A permeabilidade dos gases nos pacotes de sucata garante maior troca térmica entre os gases e a sucata no interior do forno e é proporcional a fração de vazio devido a maior área de contato entre os gases e a sucata metálica, como foi observado na Equação 4 e 5, na Figura 6 pode-se observar os resultados de pré-aquecimento da sucata no interior do forno para diferentes frações de vazio a fim de observar a influência no aquecimento da sucata.

Com a modelagem matemática do escoamento fluidodinâmico dos gases no interior do forno EOF e a modelagem matemática do aquecimento da sucata no forno utilizando a representação em domínio poroso, foi observado que o fluxo dos gases no interior do forno sofre alterações com a mudança da fração de vazio dos pacotes de sucata. Essa alteração é explicada devido a variação da permeabilidade da sucata que ocasiona a restrição (para menor fração de vazio) ou facilita (maior fração de vazio) a passagem dos gases do processo através da sucata. Durante o processo do interior

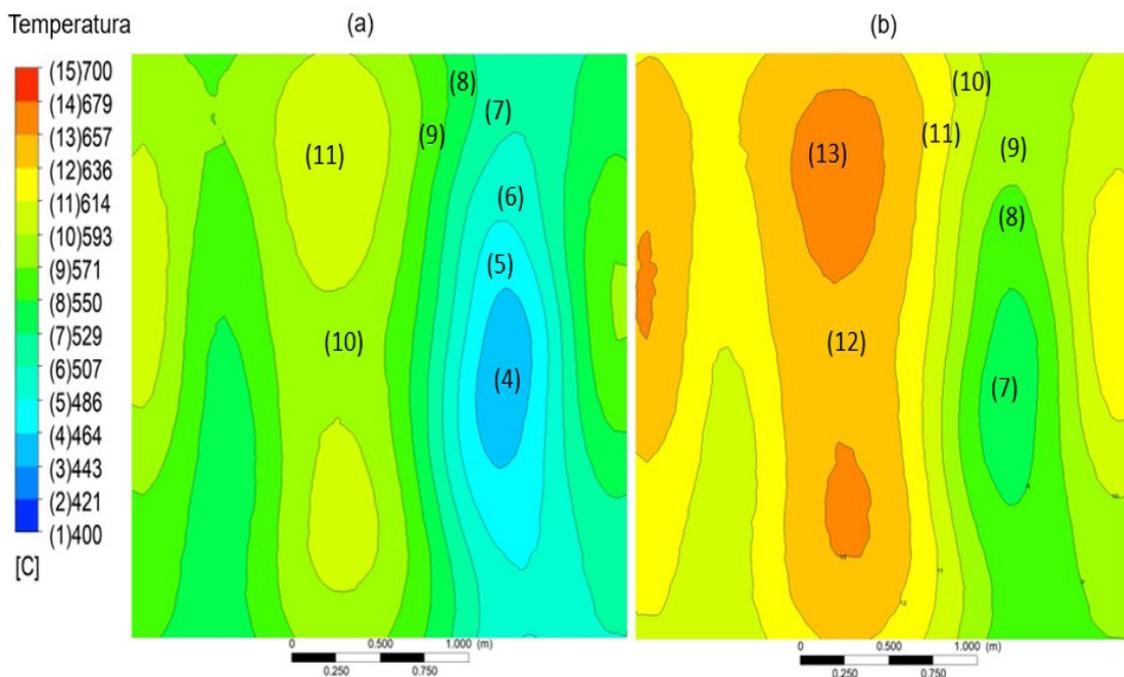
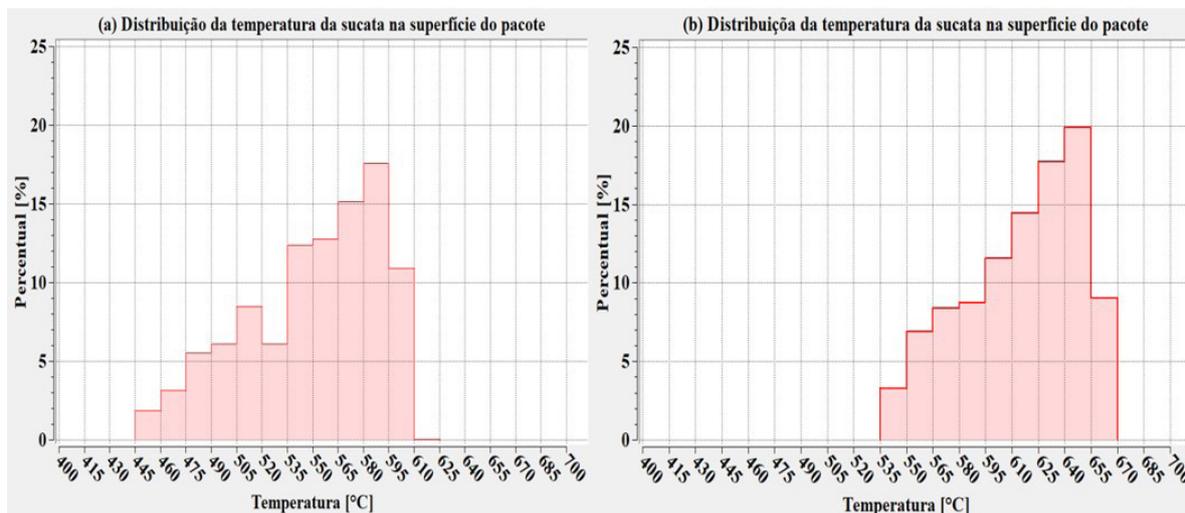
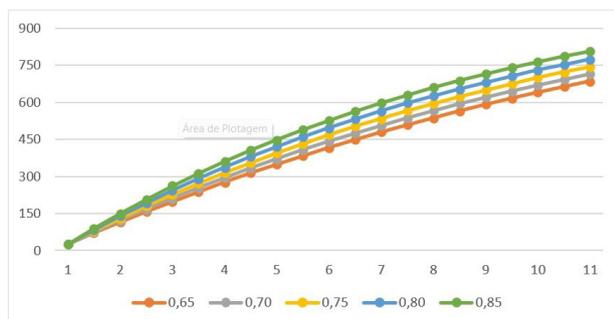


Figura 4. Perfil de temperatura sucata metálica.

Tabela 2. Resultados de temperatura do meio poroso

| Fração de vazio | Temperatura mínima (°C) | Temperatura média (°C) | Temperatura máxima (°C) |
|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0,8 | 464 | 580 | 635 |
| 0,85 | 529 | 640 | 678 |
| Medições <i>in loco</i> | 390 | 580 | 820 |

**Figura 5.** Distribuição da temperatura da sucata na superfície dos pacotes.**Figura 6.** Evolução da temperatura (°C) pelo tempo de aquecimento (min).

do forno foi medido a temperatura média da superfície da sucata após o ciclo de sopro em 580 °C com desvio padrão de ± 156 °C. As medições realizadas no forno EOF validam o modelo matemático que demonstrou temperatura média de 580 °C para 0,8 de fração de vazio da sucata e 640 °C para 0,85 de fração de vazio.

4 Conclusão

Os resultados de temperatura da sucata através da modelagem matemática utilizando a configuração do domínio poroso se mostraram válidas neste trabalho. Utilizando os

dados de processo de injeção de oxigênio, temperatura dos gases na saída do banho de aço, volume de gases de saída do sistema de exaustão é possível calcular o escoamento fluidodinâmico dos gases através das equações de conservação no interior do forno EOF. Com a utilização da fração de vazio e o diâmetro de partículas dos pacotes de sucata é possível calcular e configurar o domínio poroso para simulação da sucata no interior do forno.

As medições realizadas no EOF estudado mostraram uma média de temperatura na superfície dos pacotes de sucata de 580 °C com desvio padrão de ± 156 °C, já nas simulações através da modelagem matemática foram encontrados a média de 580 °C para 0,8 de fração de vazio e 640 °C para 0,85 de fração de vazio. A troca térmica que acontece no forno atual está compatível com a proposta do projeto do forno que são temperaturas de 800 °C. É possível concluir que quanto maior a fração de vazio, maior a troca térmica entre os gases e a sucata metálica, podendo desta forma otimizar o ganho energético do processo com um melhor processamento da carga de sucata metálica. Porém, quanto maior a fração de vazio, maior o volume interno necessário para alocação da sucata no forno fazendo com que a superfície se aproxime do duto de exaustão do sistema. Desta forma propõe-se em novos estudos uma maneira de se encontrar um volume ótimo para alocação dessa sucata de forma a melhorar a transferência de calor e maior ganho energético.

Referências

- 1 Pfeifer HC, Scherer SWG. EOF - Energy Optimizing Furnace. Divinópolis: Minitex Ltda; 2009.
- 2 Maia BT, Santos BOA, Garajau FS. Modelagem numérica do escoamento no interior do sistema de despoejamento primário do convertedor da Arcelor Mittal João Monlevade. In: Anais do 3º Seminário de Aciaria – Internacional; 2012 Maio 20-23; Belo Horizonte, Brasil. Belo Horizonte: Editora ABM; 2012.
- 3 Zerwas AA, Paiva JL. Modelagem e simulação de lavador venturi utilizando fluidodinâmica computacional. In: XXXVII ENEMP - Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados; 2015 Outubro 18-21; São Carlos. São Carlos: Editora ENEMP; 2015.
- 4 Mandal K, Irons GA. A study of scrap heating by burners. Part I: experiments. Metallurgical and Materials Transactions. B, Process Metallurgy and Materials Processing Science. 2013;44:184-195.
- 5 Arinka T, Hassan MI. Metal scrap preheating using flue gas waste heat. In: Proceedings of the 8th International Conference on Applied Energy – ICAE2016; 2016; Beijing. Beijing: Editora Elsevier Energy Procedia; 2016. p. 4788-4795

Recebido em: 11 Jun. 2022

Aceito em: 30 Maio 2024