

MODELO MATEMATICO PARA O CALCULO DO RESFRIAMENTO DE BARRAS EM BOLSAS DE ACIARIA*

Kássio Nogueira Cançado¹
Lis Nunes Soares²
Ricardo Junqueira Silva³
Luis Fernando Oliveira Rodrigues⁴

Resumo

Para resfriar as barras de aço após o processo de lingotamento contínuo, são utilizadas estruturas chamadas de bolsas de aciaria onde as barras são armazenadas, empilhadas em conjuntos de XX até YY barras. Essas bolsas tem por finalidade permitir o resfriamento lento das barras e assim melhorar a qualidade metalúrgica do material. O estudo feito teve como objetivo criar uma ferramenta computacional capaz de simular o perfil de resfriamento dessas barras, ajudando na tomada de decisão no ambiente industrial. O modelo desenvolvido permite a simulação de varias situações de carregamento, várias dimensões e tipos de barras. Os resultados obtidos foram validados numericamente com o modelo desenvolvido por SILVA ^[1] que já estava validado com testes experimentais. O erro relativo ao modelo existente foi de aproximadamente 2% o que valida os resultados e a deixa a ferramenta apta a ser utilizada no ambiente industrial. O modelo permitiu um melhor planejamento da produção, representando um potencial de ganho de 12 horas em 72 horas de produção.

Palavras-chave: Resfriamento; Barras; Modelo matemático computacional.

Mathematical model for calculation of cooling bars in steel mill bags

Abstract

For steel bars cooling after the continuous casting process, structures calls steel mill bags are used for store the bars. The bars are stacked on XX to YY sets up bars. These bags are to enable the slow cooling of the bars and thus improve the metallurgical quality of the material. The study aimed to create a computational tool able to simulate the cooling profile of these bars, helping in decision making in the industrial environment. The model allows simulation of various load situations, various sizes and types of bars. Results were validated with the numerical model developed by SILVA ^[1], which had been validated with experimental tests. The error for the existing model was approximately 2%, which validates the results and let the tool able to be used in the industrial environment. The model allowed better planning of production, representing a potential gain of 12 hours in 72 hours of production.

Keywords: Cooling; Bars; Computational mathematical model.

¹ Estudante de engenharia mecânica, estagiário, Área de Tecnologia Térmica/Superintendência Geral de Produção, Vallourec Tubos do Brasil S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

² Engenheira Mecânica, Doutora, Engenheira de Processos Sênior, Área de Tecnologia Térmica/Superintendência Geral de Produção, Vallourec Tubos do Brasil S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Doutor, Engenheiro de Processos Sênior, Área de Tecnologia Térmica/Superintendência Geral de Produção, Vallourec Tubos do Brasil S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Estudante de engenharia mecânica, estagiário, Área de Tecnologia Térmica/Superintendência Geral de Produção, Vallourec Tubos do Brasil S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Bolsas de aciaria são estruturas onde barras de aço são armazenada após serem lingotadas e cortadas. Essas bolsas têm como objetivo promover o resfriamento lento das barras armazenadas. As barras são posicionadas em diferentes instantes de tempo, e, com aproximadamente a mesma temperatura inicial.

SILVA ^[1] elaborou um código computacional capaz de representar o perfil térmico durante o resfriamento do conjunto de barras na bolsa através do cálculo do balanço de energia para cada barra. Com o auxílio do EES (Engineering Equation Solver) desenvolveu-se um código ^[1] capaz de simular a temperatura do conjunto de barras x tempo tendo como dados de entrada a temperatura inicial das barras, temperatura ambiente, diâmetro e comprimento das barras. Os resultados obtidos por SILVA ^[1] foram validados com um experimento em escala reduzida no laboratório da UFMG.

O modelo desenvolvido por SILVA ^[1] apresentou bons resultados apesar das limitações para o uso no ambiente industrial. Dentre essas limitações podemos citar: A quantidade e o diâmetro das barras eram fixos impedindo sua utilização na grande maioria das atividades; A linguagem computacional do EES apresentava uma interface gráfica pouco atrativa e com poucos recursos, exigindo do usuário um conhecimento prévio do modelo e do software; O fato de o EES ser um software acadêmico não permitia a simulação de XX (quanto) de barras e tampouco de um período XX (quanto) de tempo.

O objetivo deste trabalho foi aprimorar o modelo desenvolvido por SILVA ^[1] criando uma ferramenta matemática de fácil utilização e sem as limitações citadas acima. O novo modelo utilizou a linguagem de programação C++ para o desenvolvimento do código e da interface gráfica. Para resolução dos balanços energéticos contidos modelo matemático foi utilizada a técnica de métodos numéricos das substituições sucessivas ^[2].

O código computacional proposto foi validado numericamente através dos resultados obtidos com o código desenvolvido no EES ^[1], obtendo um erro relativo ao modelo original de aproximadamente 2%. O modelo permitiu um melhor planejamento da produção, representando um potencial de ganho de 12 horas em 72 horas de produção.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Modelo Matemático

O modelo matemático de resfriamento considera que as barras ficam posicionadas em arranjos triangulares dentro da bolsa, como na (figura 1):

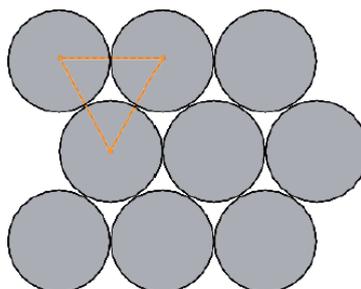


Figura 1 – Posicionamento das barras dentro da bolsa de resfriamento

Considera-se que as barras trocam calor apenas por convecção natural e radiação. As condições de contorno variam para cada barra dependendo da posição ocupada por esta dentro do arranjo. Assim como as condições de contorno o tempo de resfriamento é diferente para cada barra dependendo do momento em que esta foi carregada na bolsa.

O diâmetro, comprimento e material são os mesmos para todas as barras.

2.2 Balanço de energia

O balanço de energia foi resolvido de maneira discreta para cada barra, aproximando-se dT/dt por $\Delta T/\Delta t$ [2]. Foi adotado um passo de tempo, Δt , de 1 minuto e as propriedades dependentes da temperatura foram atualizadas a cada iteração. O equacionamento do problema é dado pela (Equação 1):

$$m \cdot C_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} = h_{conv} \cdot A \cdot (T - T_{\infty}) + F \cdot h_{rad} \cdot A \cdot (T - T_{\infty}) \quad (1)$$

Em que: m é a massa de uma barra, C_p é o calor específico do aço, T é a temperatura da barra, t é o tempo, h_{conv} é o coeficiente de transferência de calor convectivo médio, A é a área da barra, F é o fator de forma, h_{rad} é o coeficiente de transferência de calor por radiação. O coeficiente de transferência de calor por radiação foi definido pela (Equação 2):

$$h_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T + T_{\infty}) + (T^2 + T_{\infty}^2) \quad (2)$$

Em que: ε é a emissividade da superfície das barras de aço (igual a 0,91), σ é a constante de Stefan Boltzmann cujo valor é $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$. O coeficiente de transferência de calor convectivo foi definido pela (Equação 3):

$$h_{conv} = \frac{\overline{Nu} \cdot k}{D} \quad (3)$$

Em que: \overline{Nu} é o valor médio do número de Nusselt da barra, k é a condutividade térmica, D é o diâmetro da barra.

2.3 Métodos numéricos

Para resolução dos balanços de energia utilizou-se a técnica das substituições sucessivas [3], onde a Temperatura é calculada como uma função da temperatura, como na (equação 4):

$$T = f(T) \quad (4)$$

O critério de convergência do método é dado pela (equação 5):

$$\left| \frac{T_k - T_{k-1}}{T_k} \right| \leq E \quad (5)$$

Onde: $E = 0,001$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo proposto foi validado numericamente utilizando o modelo ^[1] existente e já validado experimentalmente. Para as mesmas condições iniciais foi simulado o perfil de resfriamento nos dois modelos. Na simulação o tempo $t=0$ h representa o início do resfriamento e as condições iniciais são as mesmas. Os resultados da simulação podem ser vistos na (tabela 1):

Tabela 1. Temperatura Media das barras

	0 h	20 h	40 h	60 h	80 h	100 h	120 h
Temp. Media Modelo Proposto [°C]	260	100	73	60	52	47	43
Temp. Media Modelo EES [°C]	260	100	72	58	51	45	42

As condições iniciais da simulação são as mesmas utilizadas por SILVA ^[1]

O perfil de resfriamento calculado pelos dois modelos pode ser visto na (figura 2):

Validação do modelo matematico

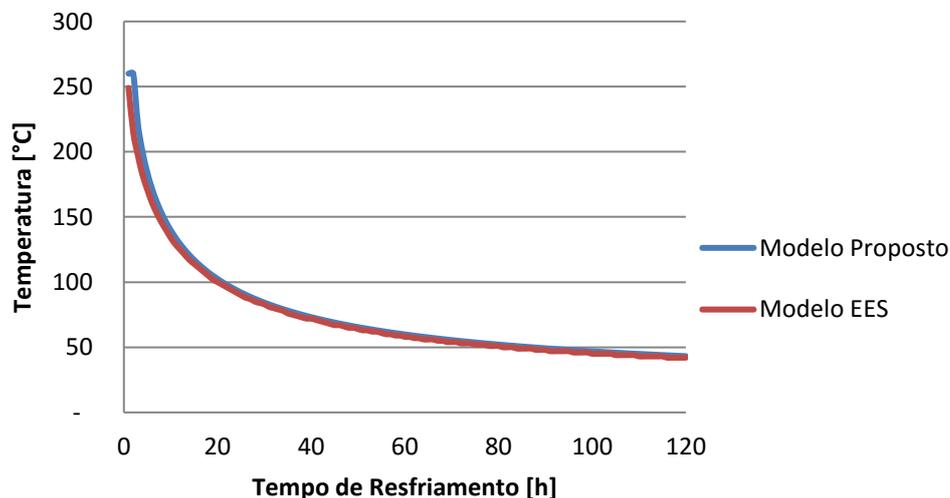


Figura 2. Perfil de resfriamento simulado.

O erro relativo do modelo proposto em relação ao modelo desenvolvido no EES foi calculado segundo a (equação 6):

$$Erro = \frac{T_{EES} - T_{Modelo}}{T_{EES}} \cdot 100 \quad (6)$$

O erro relativo do modelo proposto em relação ao modelo do EES pode ser visto na tabela 2:

	0 h	20 h	40 h	60 h	80 h	100 h	120 h
Erro relativo	-	0%	-2%	-3%	-2%	-4%	-2%

O erro relativo médio do modelo foi de aproximadamente 2%.

4 CONCLUSÃO

O resultado obtido com o novo modelo gerou um erro relativo ao modelo anterior de aproximadamente 2%. Erro se deve principalmente a diferença entre bibliotecas de propriedades dos materiais nos dois modelos e também a diferente técnica de métodos numéricos.

O erro encontrado é pequeno atendendo as necessidades industriais a que esse trabalho se propõe. Desse modo a ferramenta computacional esta apta a ser utilizada no ambiente industrial.

O modelo de resfriamento permitiu uma melhor programação do descarregamento das barras contidas na bolsa. Apresentando um ganho potencial de aproximadamente 12 horas em 72 horas de produção.

Agradecimentos

À empresa Vallourec Tubos do Brasil S.A. por fomentar trabalhos de pesquisa e desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- 1 SILVA, P. C. S., "Análise numérica e experimental do resfriamento do carregamento de barras de aço." 2014. 82f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em engenharia mecânica, Belo Horizonte, 2014.
- 2 INCROPERA, F. P., DeWITT, D. P., Fundamentos de transferência de calor e de massa, 5aed. Rio de Janeiro: LTC, 2003, 698p
- 3 CHAPRA, S. C., Applied Numerical Methods With MATLAB, 3aed. Rio de Janeiro: MC Graw Hill, 2004, 384p.