



SIMULAÇÃO DE ALETA EM REGIME ESTACIONÁRIO COM TROCA TÉRMICA POR CONVECÇÃO

Amanda Tamiris Monteiro Santos¹
Erickson Alex de Lima²
Marco Antonio Cardoso de Souza³

Resumo: O estudo visa a projeção de uma simulação de modelagem da transferência de calor em um cilindro de aço inoxidável submetido a aquecimento interno e resfriamento externo por meio da convecção natural. Utilizando o software COMSOL *Multiphysics*, é possível visualizar o comportamento térmico transiente da aleta, para a compreensão do processo de dissipação de calor e os gradientes de temperatura ao longo do corpo sólido. A simulação baseia-se nos princípios de condução térmica e convecção natural, permitindo a análise de condições realistas aplicadas em processos industriais. Os resultados simulados evidenciam o controle térmico em sistemas metálicos e a aplicação da modelagem computacional no ensino e na prática de engenharia térmica.

Palavras-chave: Transferência de calor; COMSOL Multiphysics; condução térmica; convecção; simulação numérica.

Abstract: The study aims to design a modeling simulation of heat transfer in a stainless steel cylinder subjected to internal heating and external cooling through natural convection. Using COMSOL *Multiphysics* software, it is possible to visualize the transient thermal behavior of the fin, to understand the heat dissipation process and temperature gradients along the solid body. The simulation is based on the principles of thermal conduction and natural convection, allowing the analysis of realistic conditions applied in industrial processes. The simulated results show the thermal control in metallic systems and the application of computational modeling in the teaching and practice of thermal engineering.

Keywords: Heat transfer; COMSOL Multiphysics; thermal conduction; convection; numerical simulation.

1. INTRODUÇÃO

¹ Graduando do curso de Engenharia Química, pela UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: amandamonteiro34@gmail.com.

² Professor do curso de Engenharia Química da UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: erickson.lima@unifateb.edu.br.

³ Professor do curso de Engenharia Química da UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: marco.souza@unifateb.edu.br.



O controle térmico de componentes metálicos é fundamental em indústrias como a automotiva, siderúrgica, alimentícia e de papel e celulose, impactando diretamente a durabilidade, a eficiência energética e a segurança operacional dos equipamentos. A dissipação de calor ocorre por diversos mecanismos físicos, entre eles a condução no interior do material e a convecção na interface com um fluido, presentes em inúmeras aplicações práticas (INCROPERA; DEWITT, 2011).

Este trabalho tem como objetivo simular a transferência de calor em um cilindro de aço inoxidável previamente aquecido e resfriado por convecção, analisando o comportamento térmico transiente e os gradientes de temperatura. A utilização do software COMSOL Multiphysics permite modelar geometrias complexas, condições de contorno variadas e propriedades reais dos materiais, proporcionando visualização detalhada e validação de modelos teóricos, otimizando processos e reduzindo custos experimentais (BERGMAN; LAVINE, 2017; CREMASCO, 2016; COMSOL, 2019).

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O estudo da transferência de calor é fundamental para a análise e o projeto de sistemas térmicos em diversas áreas da engenharia. A transferência de energia térmica, em sua essência, ocorre por meio de três mecanismos principais: condução, convecção e radiação. No contexto deste trabalho, a simulação se concentra nos fenômenos de condução e convecção, com especial ênfase na sua interação.

2.1.1 Transferência de Calor

A transferência de calor é um fenômeno físico presente em grande parte dos processos naturais e industriais. Ela ocorre de três formas principais: condução, convecção e radiação térmica. No contexto desta simulação, são relevantes a condução no interior do cilindro metálico e a convecção natural no fluido circundante, sendo a radiação desprezível em ambientes líquidos de baixa temperatura (BERGMAN; LAVINE, 2017).



2.1.2 Condução Térmica

A condução térmica é o mecanismo de transferência de energia através de um meio sólido ou estacionário, impulsionada por um gradiente de temperatura. Neste processo, a energia é transmitida por meio da interação molecular ou por elétrons livres, sem o transporte macroscópico de massa. A Lei de Fourier é a base para a modelagem da condução, descrevendo a taxa de transferência de calor (q) como proporcional ao gradiente de temperatura e à área de superfície (A) através da qual o calor flui, sendo a condutividade térmica (k) a constante de proporcionalidade do material (INCROPERA e DEWITT, 2011).

$$q = -k \cdot \nabla T$$

Para a simulação de um cilindro em aço inoxidável, a condutividade térmica (k) do material é um parâmetro crítico. O aço inoxidável 304, material amplamente utilizado em aplicações industriais e na qual está simulação se baseia, possui uma condutividade térmica relativamente baixa em comparação com outros metais, com um valor de aproximadamente $16,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ à temperatura ambiente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (AÇOS NOBRE, 2024). A modelagem por elementos finitos permite resolver a equação da difusão de calor, considerando a condutividade e a capacidade térmica do aço, para prever a distribuição de temperatura no interior do cilindro em um regime transiente.

Esse fenômeno depende de propriedades como condutividade térmica, calor específico e densidade. Materiais metálicos, como o aço inoxidável, possuem boa condutividade térmica, permitindo rápida dissipação de calor, embora sua condutividade seja menor que a de metais puros, influenciando o tempo de resfriamento (INCROPERA; DEWITT, 2011).

2.1.3 Convecção Térmica

A convecção térmica é o mecanismo de transferência de calor que envolve a movimentação de um fluido (líquido ou gás). Ela pode ser classificada como forçada (quando o movimento do fluido é causado por uma fonte externa, como uma bomba) ou natural (quando o movimento é induzido por diferenças de densidade do fluido,



resultantes de gradientes de temperatura). A convecção natural é o processo dominante quando o fluido aquecido se expande, torna-se menos denso e ascende, enquanto o fluido mais frio e mais denso desce, estabelecendo um movimento de circulação (BERGMAN e LAVINE, 2017).

2.1.4 Resistência Térmica de Contato

A resistência térmica na interface sólido-fluido influencia diretamente a taxa de transferência de calor. Fatores como rugosidade, área de contato efetiva e a camada limite térmica do fluido determinam a eficiência da troca térmica. A modelagem adequada desta interface contribui para simulações mais realistas e para o entendimento do comportamento térmico do sistema (CREMASCO, 2016).

2.1.5 Integração de Condução e Convecção em Simulação

Integrar condução e convecção em uma simulação permite avaliar com precisão o comportamento térmico de sistemas reais, contribuindo para otimização de processos industriais, redução de custos energéticos e melhoria do desempenho térmico de equipamentos. Softwares como o COMSOL Multiphysics permitem testar virtualmente diversas condições operacionais, validando modelos teóricos e otimizando o resfriamento controlado de componentes metálicos (CAMPOS, 2010).

2.2 METODOLOGIA

A simulação foi realizada no software COMSOL Multiphysics 5.2, utilizando o módulo Heat Transfer in Solids, com as seguintes condições:

- a) Geometria tridimensional composta por um cilindro sólido de aço inoxidável com dimensões de 30 cm de altura e 2 cm de diâmetro, com fluido de resfriamento passando entre as paredes;
- b) Condições iniciais: o cilindro foi aquecido a 373,15 K (100 °C), enquanto a água do tanque foi mantida a 293,15 K (20 °C);



c) Condições de contorno: convecção natural no fluido e condução no sólido com interface térmica acoplada.

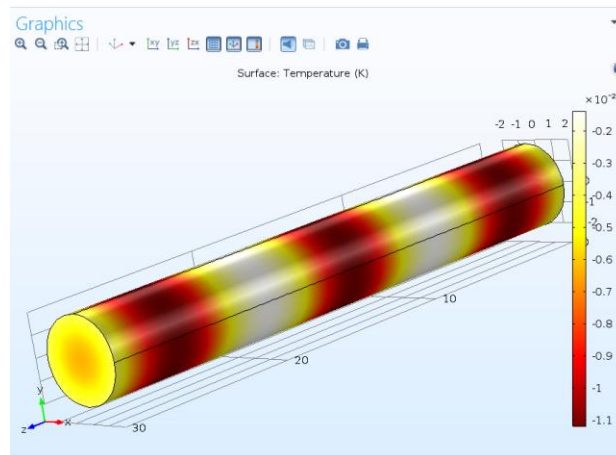
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a simulação de um cilindro em aço inoxidável, a condutividade térmica (k) do material é um parâmetro crítico. O aço inoxidável, material amplamente utilizado em aplicações industriais e na qual está simulação se baseia, possui uma condutividade térmica relativamente baixa em comparação com outros metais, com um valor de aproximadamente $16,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ à temperatura ambiente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (AÇOS NOBRE, 2024). A modelagem por elementos finitos permite resolver a equação da difusão de calor, considerando a condutividade e a capacidade térmica do aço, para prever a distribuição de temperatura no interior do cilindro em um regime transiente.

A convecção natural é o principal mecanismo de resfriamento nessa simulação. O cilindro, inicialmente aquecido, transfere calor para a água circundante. A água próxima à superfície do cilindro aquece, tem sua densidade reduzida e se eleva. Concomitantemente, a água mais fria e densa se move para o fundo, criando um fluxo contínuo. Esse processo de transferência de calor na interface sólido-fluido é descrito pelo coeficiente de convecção (h), que quantifica a taxa de troca térmica e é um parâmetro fundamental para a simulação do resfriamento. Um estudo recente sobre o resfriamento de cilindros de aço demonstra a importância da modelagem da convecção natural na validação de resultados de simulação com dados experimentais (RIBEIRO et al., 2024).

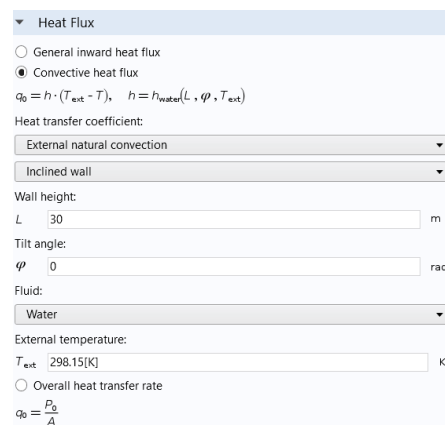
Os resultados obtidos mostram uma dissipação progressiva da energia térmica do cilindro para a água, evidenciando a formação de gradientes térmicos. A temperatura do cilindro se homogeneizou, aproximando-se da temperatura da água, conforme esperado em sistemas de resfriamento natural.

Imagem 1. Simulação de aleta em regime estacionário com troca térmica por convecção



Fonte: Autores, 2025.

Imagem 2. Condições de resfriamento



Fonte: Autores, 2025.

A distribuição de temperatura observada indica que a maior resistência térmica está concentrada na camada limite entre os dois domínios físicos. Isso corrobora a importância da área de contato e da diferença de temperaturas na taxa de transferência de calor. A simulação permite, ainda, prever o tempo necessário para que o sistema atinja o equilíbrio térmico, o que é fundamental para a otimização de processos industriais, como têmpera, resfriamento pós-forjamento ou tratamentos superficiais térmicos.



Estudos recentes, como o de Ribeiro et al. (2024), que analisou o resfriamento de cilindros de aço, demonstram a importância da modelagem da convecção natural para validar resultados de simulação com dados experimentais. A similaridade dos comportamentos térmicos observados em nossa simulação e na literatura demonstra a validade do nosso modelo e reforça a confiabilidade da abordagem numérica como ferramenta de análise.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento da simulação numérica de transferência de calor em um cilindro sólido de aço inoxidável sob resfriamento com água possibilitou uma compreensão aprofundada dos mecanismos térmicos envolvidos no processo de resfriamento. A utilização do software COMSOL *Multiphysics* demonstrou-se eficaz para modelar o fenômeno de condução térmica no sólido e a convecção natural no fluido, evidenciando as interações entre geometria, propriedades dos materiais e condições de contorno.

Foi possível a visualização da dissipação do calor e a distribuição de temperaturas dentro do corpo cilíndrico, permitindo concluir que o sistema atinge equilíbrio térmico de forma gradual e dependente da diferença inicial de temperatura entre o sólido e o meio refrigeração. Dessa forma, os objetivos propostos na introdução foram plenamente atingidos, validando a simulação como uma ferramenta útil para análise térmica em projetos industriais e acadêmicos.

Entre as limitações do estudo, destaca-se a consideração da água como fluido incompressível com propriedades constantes, o que pode não representar com total precisão o comportamento em temperaturas mais elevadas. Além disso, a ausência de turbulência no modelo pode subestimar os efeitos de convecção em configurações mais complexas.



REFERÊNCIAS

AÇOS NOBRE. **Aço Inox 304: Tudo o que você precisa saber!**. 2024. Disponível em: <https://acosnobre.com.br/blog/aco-inox-304/>. Acesso em: 24 set. 2025.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.

CAMPOS, M. C. M. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

COMSOL. **COMSOL Multiphysics Reference Manual**. Version 5.5. Burlington, MA: COMSOL Inc., 2019.

CREMASCO, M. A. **Fundamentos de transferência de massa**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 6. ed. New York: John Wiley & Sons, 2011.

RIBEIRO, F. F. et al. Análise de resfriamento de um cilindro de aço: estudo experimental da convecção e radiação do calor. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 46, n. 4, e20240121, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/r64CmzVc9qZrtXKjXY5Q5XG/>. Acesso em: 24 set. 2025.

WELTY, J. R.; RORRER, G. L.; FOSTER, D. G. **Fundamentos de transferência de momento, de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.