

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM FORNO DE FUNDIÇÃO PARA FINS DIDÁTICOS: UMA PROPOSTA DE INSTRUMENTAÇÃO PARA O ENSINO DE FÍSICA TÉRMICA

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A FOUNDRY OVEN FOR TEACHING PURPOSES: AN INSTRUMENTATION PROPOSAL FOR TEACHING THERMAL PHYSICS

Denise A. do Nascimento¹, Gilmar Alves da Silva², Andrews S. Vieira³

¹Universidade Federal de Roraima/Leducarr, denise.nascimento@ufr.br

²Instituto Federal de Roraima, gilmar.silva@ifrr.br

³Centro Universitário do Norte-Uninorte, andrews.pessoal@gmail.com

Resumo

O ensino de transferência de calor nos cursos de engenharia, física e áreas afins, constitui um tópico de fundamental importância na formação de futuros profissionais que possam vir a atuar diretamente em áreas vinculadas à metalurgia, engenharia de materiais, máquinas térmicas, etc., pois fornece informações gerais e necessárias para que o aluno possa compreender, avaliar, quantificar e controlar os processos físicos ali tratados. Desse modo, torna-se imprescindível integrar a teoria com a prática, correlacionando os conhecimentos adquiridos em sala de aula a processos aplicados dentro da engenharia e na indústria. Portanto, tendo em vista a necessidade de visualizar a aplicabilidade da teoria física, iremos apresentar um estudo dos mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e radiação) através do projeto e construção de um mini forno de fundição, seguindo todas as características de um modelo industrial, tal como forma geométrica, queimadores e revestimento interno. O protótipo do mini forno demonstrou-se um recurso didático eficiente, onde foi possível aliar o ensino dos mecanismos de transferência de calor a processos reais de uma indústria metalúrgica, facilitando a compreensão dos alunos sobre os conteúdos estudados.

Palavras-chave: Ensino de física, física aplicada, Transferência de calor, forno de fundição.

Abstract

The teaching of heat transfer in engineering, physics and related fields is a topic of fundamental importance in the training of future professionals who may come to work directly in areas related to metallurgy, materials engineering, thermal machines, etc., because provides general and necessary information so that the student can understand, evaluate, quantify and control the physical processes treated there. Thus, it is essential to integrate the student with practice, correlating the knowledge acquired in the classroom with processes applied within engineering and industry.

Therefore, in view of the need to visualize the applicability of physical theory, we will present a study of the mechanisms of heat transfer (conduction, convection and radiation) through the design and construction of a mini smelting furnace, following all the characteristics of an industrial model, such as geometric shape, burners and internal coating. The prototype of the mini oven proved to be an efficient didactic resource, where it was possible to combine the teaching of heat transfer mechanisms with real processes in a metallurgical industry, facilitating students' understanding of the studied contents

Keywords: Teaching physics, applied physics, heat transfer, smelting furnace.

1. Introdução

Em projetos de equipamentos industriais como caldeiras, máquinas térmicas, trocadores de calor, aquecedores, dentre outros, é imprescindível o conhecimento dos mecanismos de transferência de calor na interface que delimita um corpo sólido e um fluido (GARCIA, 2017), o que torna o ensino destes mecanismos nos cursos de engenharia, física e áreas afins, como um tópico de fundamental importância na formação de futuros profissionais que possam vir a atuar diretamente em áreas vinculadas à processos metalúrgicos, engenharia de materiais, etc.

As três formas pela qual o calor é transferido entre corpos que se encontrem a diferentes temperaturas são a condução, convecção e radiação, cujos modelos são baseados nas leis de Fourier, de resfriamento de Newton e de Stefan-Boltzmann, respectivamente. A condução é o principal mecanismo de transferência de calor nos sólidos entre zonas a temperaturas diferentes. Um gradiente de temperatura em uma amostra de substância homogênea resulta em uma taxa de transferência de energia dentro desse meio, que é dada pela lei de Fourier,

$$q = -kA \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

onde dT/dx é o gradiente de temperatura na direção normal à área A ; k é a condutividade térmica expressa por $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. O sinal negativo que aparece na lei de Fourier é um requisito da segunda lei da termodinâmica, requerendo que a transferência de energia térmica resultante de um gradiente de temperatura seja orientada na direção da região de maior temperatura para a de menor temperatura.

Perdas de energia ocorrem devido à convecção do ar nas vizinhanças do corpo, obedecendo à lei do resfriamento de Newton $q = hA(T_b - T_a)$, onde h é o coeficiente de transferência de calor medido em $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, perda de radiação pela lei de Stefan-Boltzmann e condução térmica com outros sólidos na vizinhança do experimento.

Portanto, com o intuito de promover uma maior compreensão dos alunos ao estudar os mecanismos de transferência de calor, projetamos e construímos um mini forno de fundição industrial fazendo uma abordagem prática do assunto e facilitando a compreensão dos cálculos referentes ao fluxo de calor através das paredes do

forno. O processo de construção e desenvolvimento do projeto contou com a participação de alunos do segundo e quinto períodos de engenharia mecânica, permitindo que os mesmos desenvolvessem habilidades, tais como: observação, medição, controle de variáveis, cuidados experimentais, escolha de material e processos, etc. Ressaltamos ainda que o projeto foi apresentado na V Mostra acadêmica do Centro Universitário do Norte - Uninorte em 2018, ficando em primeiro lugar entre os mais de 30 projetos apresentados no evento. O evento contou com a presença da comunidade acadêmica, sendo aberta para a comunidade em geral e alunos do ensino médio.

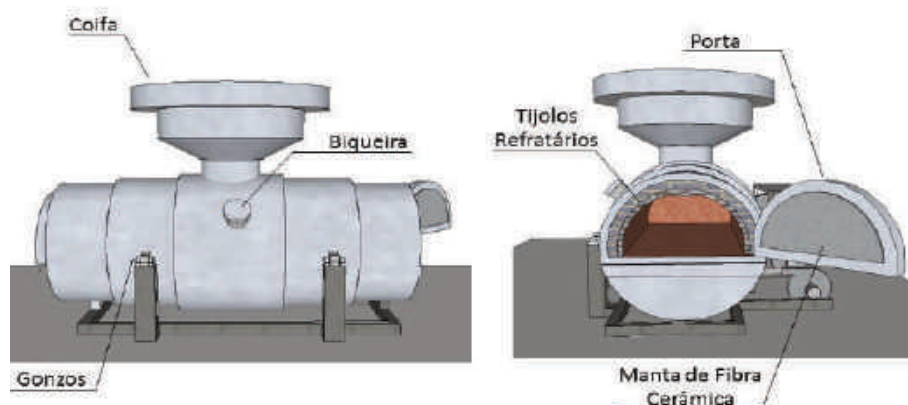
2. Materiais e Métodos

A condução de calor no regime permanente em geometrias cilíndricas ocorre em inúmeras aplicações na engenharia e tem sido objeto de muitos estudos nos últimos anos (BURMEISTER, 2002), o que levou a iniciarmos nosso projeto a partir de fornos de configuração cilíndrica. Logo, ao se estudar os mecanismos de transferência de calor viu-se necessidade de adotarmos uma metodologia que pudesse ir além da demonstração de equações, mas que possibilitasse aos alunos uma discussão sobre o problema da solução da lei de Fourier em coordenadas cilíndricas e suas aplicações práticas em experimentos de termodinâmica.

Utilizamos um barril cilíndrico de aço/carbono 1020 com 28,2 cm de diâmetro da base e comprimento de 50 cm. Optou-se pela utilização desse aço devido à sua grande utilização na indústria e alta resistência à temperatura. Por se tratar de uma réplica de um forno de fundição industrial, fixaram-se gonzos nas laterais do cilindro de modo que este atingisse uma inclinação de aproximadamente 50 graus para retirada de material após o processo de fundição. Em seguida, fixaram-se os demais componentes do forno: porta, biqueira de retirada, coifa e suporte dos queimadores. Para possibilitar um bom isolamento térmico e impedir a perda de calor pelas laterais, toda parte interna do forno foi revestida com argamassa e refratário de sílica de alumínio; todo contorno da porta foi revestido com manta de fibra cerâmica. Para a pintura da superfície externa, utilizamos tintas resistentes a altas temperaturas e com alta capacidade de absorção de calor. As Figuras 1 e 2 mostram esquematicamente os detalhes do projeto e construção do forno.

Desse modo, observa-se que através do projeto, o aluno pôde participar diretamente da construção do conhecimento, sendo aprofundados não somente conceitos teóricos relacionados ao estudo dos mecanismos de transferência de calor. Pode-se destacar que o aparato permitiu aos alunos desenvolverem com precisão o cálculo do fluxo de calor na aproximação de paredes adiabáticas ou em corpos sólidos; especificar diferentes tipos de fontes de calor; conhecer e decidir pela utilização de materiais a partir de suas propriedades físicas, como condutividade térmica, capacidade de calor, etc.

Figura 1. Representação esquemática do projeto do mini forno de fundição industrial que possibilita a análise térmica proposta.



Fonte: (Os autores).

Figura 2. Etapas de construção e acabamento do forno.



Fonte: (Os autores)

Outrossim, a construção do mini forno de fundição industrial nos permitiu um estudo teórico experimental baseado em processos elementares realizado em indústrias metalúrgicas. As medidas realizadas pelos alunos consistiram em (i)

realizar a secagem e sinterização do material refratário empregado no forno (ii) coletar os dados da temperatura versus tempo para obtenção da curva de aquecimento e (iii) obtenção da taxa de calor através das paredes do forno.

3. Resultados

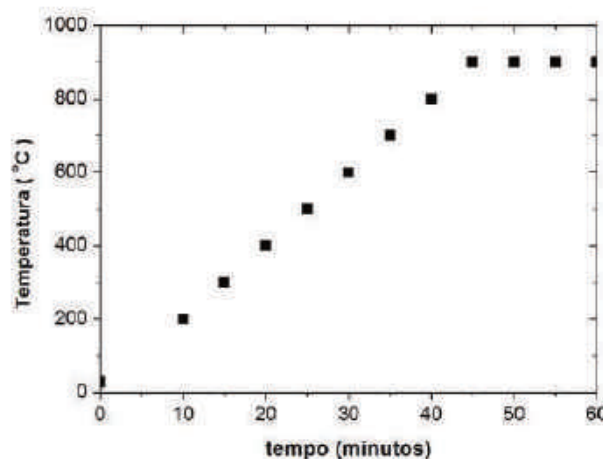
3.1. Processo de Secagem e Sinterização

Após revestirmos o interior do forno com concreto refratário, fizemos com que este passasse pelo o processo de secagem e sinterização. Arnosti Jr et al. (1999) definem o processo de secagem como a etapa do processamento de concretos refratários onde a água indesejável do material é extraída da forma mais rápida e com o menor gasto de energia possível. Após a secagem, os concretos refratários são sinterizados, reduzindo-se desse modo a área específica, volume aparente total e aumentando a resistência mecânica dos mesmos. O monitoramento e os registros térmicos foram realizados através de um termopar devidamente posicionado na superfície interna do forno.

3.2. Aquecimento do forno

Durante o aquecimento fez-se o monitoramento da temperatura em função do tempo transcorrido. Observamos que o forno atingiu uma temperatura de 900°C em um tempo de 45 minutos, o que nos possibilitou fazer a análise gráfica através da curva de aquecimento conforme mostrado na Figura 3. Para medida da temperatura da superfície externa do forno utilizamos um termômetro digital laser, onde registramos um valor de 42°C, o que nos leva a concluir a eficácia do material refratário aplicado, pois a temperatura ambiente estava em torno de 27 °C.

Figura 3. Curva de aquecimento do forno.



Fonte: (Os autores).

Com as medidas da temperatura nas superfícies interna e externa do forno, podemos calcular ainda a taxa de transferência de calor para um cilindro homogêneo com raio interno r_i , raio externo r_{i+1} e comprimento L . Sendo T_i a

temperatura na cavidade interna, T_{i+1} a temperatura na sua superfície externa e $T(r)$ a distribuição de temperatura radial, a taxa de perda de calor q_p e a definição da resistência térmica R_t do cilindro são obtidas a partir da solução da equação de Fourier, Eq. (1), com as condições de contorno apropriadas (INCROPERA, 2008). Portanto, essas quantidades são dadas pelas seguintes expressões:

$$q_p = \frac{(T_i - T_{i+1})}{R_t} \quad (2)$$

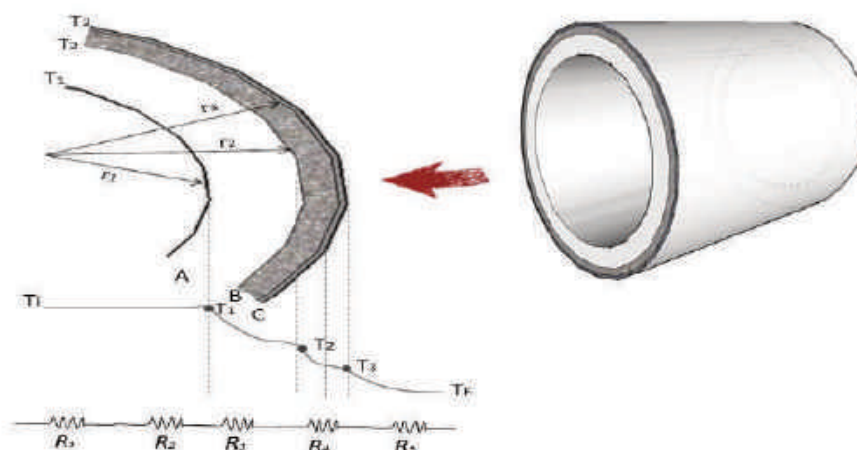
onde,

$$R_t = \sum_{i=1}^{i+1} \frac{\ln(R_i / R_{i+1})}{2\pi Lk} \quad (3)$$

Sabendo que os valores da condutividade térmica dos materiais utilizados para o desenvolvimento do forno (aço carbono: $k = 69,5 \text{ W/mK}$; tijolo refratário: $k = 0,026 \text{ W/mK}$; argamassa: $k = 0,72 \text{ W/m.K}$) e com as medidas de temperatura obtidas, podemos calcular o gradiente de temperatura, a taxa de calor q_p , a resistência térmica R_t e comparar os valores estimados pelas Eqs. (2-3) com os valores tabulados na literatura metalúrgica.

O fluxo de calor através das paredes do forno é afetado por uma série de resistências térmicas. A Figura 4 apresenta um esquema ilustrativo da distribuição de temperaturas e modos de transferência de calor que podem ocorrer ao longo do processo de aquecimento do forno com suas respectivas resistências térmicas, onde através da Eq. 3 obtemos as resistências: convecção na interface ar interno/refratário ($R_1 = 14,83 \text{ K/W}$); condução térmica no refratário/argamassa ($R_2 = 1,764 \text{ K/W}$) e aço/argamassa ($R_3 = 0,019 \text{ K/W}$); convecção na superfície externa aço/ambiente ($R_4 = 0,084 \text{ K/W}$); neste estudo inicial desprezamos a transferência de calor por radiação térmica. Com o cálculo das resistências térmicas, podemos obter o fluxo de calor, Eq. 4, aproximado para o forno sendo $q_p = 22 \text{ W}$. Os valores obtidos para as resistências térmicas e fluxo de calor concordam com aproximação aceitável com os valores tabulados na literatura metalúrgica (SOARES, 2000). Assim, podemos concluir que o aparato discutido nesse trabalho é uma excelente proposta didático-pedagógica para ensino de física, termodinâmica, transferência de calor e massa com boas possibilidades aprimoramento.

Figura 4. Distribuição de temperaturas e resistências térmicas na interface e nas paredes do forno.



Fonte: (Os autores).

4. Conclusão

A partir do estudo realizado, apresentamos o desenvolvimento e construção de um projeto simples, que envolve a análise da transferência de calor em um forno de fundição industrial. Notamos que a barreira de isolamento criado nas paredes do forno foi capaz de reter uma quantidade considerável de calor na parte interna do mesmo, tornando-o um equipamento eficiente e com baixa perda de energia. Foi possível ainda correlacionar a teoria física dos mecanismos de transferência de calor ao processo de fabricação na indústria metalúrgica através de fornos de fundição, aliando o estudo detalhado sobre os tratamentos térmicos e escolha de material a uma ampla e sólida base nos fundamentos da análise conceitual da teoria física. Podemos concluir ainda que o aparato apresentado neste trabalho pode ser adotado como uma proposta de instrumentação para o ensino de física e engenharia.

Referências

- GARCIA, R. L.; AMARAL, R. A.; ZABADAL, J.; PIBERNAT, C. C.; JUCHEM, F.; SCHMITZ, A. Resfriamento de um cilindro de aço: estudo experimental da convecção e radiação do calor. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 39, nº 4, e4501 (2017).
- BURMEISTER, L. C., The Effect of Space-Dependent Thermal Conductivity on the Steady Central Temperature of a Cylinder, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 124, pp. 195-213, 2002.
- ARNOSTI JR., S; INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI V. C. Variáveis críticas no processo de secagem de concretos refratários. *Cerâmica*, São Paulo, v. 45, n. 292-293, mar.-jun. 1999.
- SOARES, G. A.; *Fundição: Mercado, Processos e Metalurgia*. Abril, 2000.
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P.; BERGNAN, T.L.; LAVINE, A.S., *Fundamentos da Transferência de Calor e Massa* (LTC Editora, São Paulo, 2008), 6a ed., p. 38-50 e p. 73-75.