

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE COMBINADO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE O AQUECIMENTO DO AÇO AISI 5160 EM UM FORNO MUFLA

Sóstenes Pinheiro Campos, sostenes.spc@gmail.com¹

Alisson Augusto Azevedo Figueiredo, alissonfigueiredo@professor.uema.br¹

¹Universidade Estadual do Maranhão, Cidade Universitária Paulo VI, Av. Lourenço Vieira da Silva N° 1000, CEP: 65.055-310, Jardim São Cristóvão – São Luís/MA.

Resumo. O objetivo deste trabalho é realizar de forma experimental a estimativa do coeficiente combinado de transferência de calor durante o aquecimento do aço AISI 5160 em um forno mufla. O método da capacitância global foi utilizado para caracterizar o aquecimento da peça. Um total de 21 experimentos foram realizados em 7 temperaturas distintas para o forno, variando de 300 a 900 °C durante 600 s. As temperaturas foram medidas por um termopar tipo K embutido na peça a ser aquecida e conectado ao sistema de aquisição de dados. Um algoritmo no software MATLAB foi desenvolvido para a determinação dos resultados a partir das temperaturas medidas e equações apropriadas para o fenômeno térmico. Os resultados mostraram que o coeficiente combinado de transferência de calor aumenta com a elevação da temperatura do forno. A contribuição da convecção no aquecimento da peça diminui com o aumento da temperatura. O coeficiente de radiação aumenta com a temperatura, tornando-se o único mecanismo significativo de transferência de calor no interior do forno a partir de 600°C. As taxas de calor foram maiores no início do aquecimento, principalmente a parcela da radiação, mas decrescem com o tempo, devido a diminuição da diferença de temperatura entre a peça e o forno.

Palavras chave: coeficiente de transferência de calor, convecção, radiação, forno mufla, aço AISI 5160.

Abstract. The objective of this work is to experimentally estimate the combined heat transfer coefficient during the heating of AISI 5160 steel in a muffle furnace. The global capacitance method was used to characterize the heating of the part. A total of 21 experiments were carried out at 7 different oven temperatures, ranging from 300 to 900 °C for 600 s. The temperatures were measured by a K-type thermocouple embedded in the part to be heated and connected to the data acquisition system. An algorithm in MATLAB software was developed to determine the results from the measured temperatures and appropriate equations for the thermal phenomenon. The results showed that the combined heat transfer coefficient increases with increasing furnace temperature. The contribution of convection to part heating decreases with increasing temperature. The radiation coefficient increases with temperature, becoming the only significant heat transfer mechanism inside the kiln from 600°C. The heat rates were higher at the beginning of heating, mainly the radiation portion, but decreased with time, due to the decrease in the temperature difference between the piece and the oven.

Keywords: heat transfer coefficient, convection, radiation, muffle furnace, AISI 5160 steel.

1. INTRODUÇÃO

Os tratamentos térmicos são principalmente utilizados em componentes metálicos, com o objetivo de obter propriedades mecânicas específicas de acordo com sua aplicação, tais como: tenacidade, ductibilidade, dureza e usinabilidade. De acordo com as aplicações de cada material, estes devem ter suas propriedades modificadas por meio de aquecimento e resfriamento em ambiente controlado (temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento). Dos diferentes tipos de tratamentos térmicos existentes, destacam-se como os principais a têmpera, a normalização, o recozimento e o revenimento (PINEDO, 2021).

Nos processos de tratamentos térmicos é fundamental compreender as distribuições de temperatura no interior do material, possibilitando previsibilidades do tempo e temperatura requerida, e evitando futuras falhas mecânicas em virtude de tensões térmicas residuais. As previsibilidades do campo de temperatura e do coeficiente de transferência de calor combinado (convecção e radiação) são essenciais no processo de transferência de calor no material submetido a qualquer tratamento térmico. Um rigoroso controle durante o tratamento térmico possibilita otimizar o sistema que visa a potência

máxima do forno e a redução do tempo necessário para realização do processo, além de alcançar as propriedades exigidas para o material (JOACHIMIÁK *et al.*, 2019)

Segundo Sartori (2022), existem manuais fornecidos pelas empresas fabricantes de aços, sobre o tempo de permanência da peça em determinada temperatura para alcançar a austenitização. Mas alerta que, sempre deve-se levar em consideração o tipo de forno a ser utilizado para o aquecimento. Portanto, é de suma importância o desenvolvimento de métodos capazes de prever a transferência de calor para qualquer temperatura de trabalho em um forno.

Segundo Chiaverini (2012, p.82), os fenômenos físicos envolvidos em um tratamento térmico estão diretamente relacionados com os efeitos da transferência de calor no processo, e sendo alguns dos principais parâmetros; temperatura, tempo e velocidade de resfriamento. De acordo com Incropera *et al* (2014) e com Çengel e Ghajar (2012), a transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço. O trânsito de energia pode ocorrer por três mecanismos distintos: condução, convecção e radiação térmica.

Valerio e Basto (2016) analisaram numericamente e experimentalmente a transferência de calor em um forno mufla. As medições de tensão foram realizadas nas paredes do forno a cada 20 s até o tempo total de 740 s, as temperaturas variaram de 0 a 300°C. A temperatura das paredes do forno aumentaram de forma quase linear em função do tempo. A maior diferença de temperatura ocorreu entre a parede da base e a parede da porta, onde após 720 s a diferença de temperatura foi de aproximadamente 82 °C, devido a parede da porta do forno não possuir resistência elétrica para aquecimento. A análise numérica reafirma que a maior diferença de temperatura é entre a parede da base e a parede da porta.

Dessa forma, este trabalho propõe avaliar a dependência do coeficiente combinado de transferência de calor durante o aquecimento do aço AISI 5160, com a variação da temperatura em um forno mufla. A partir do conhecimento deste coeficiente e das propriedades termofísicas do material e do ar contido no forno, pode-se estimar o tempo necessário de aquecimento de peças, otimizando assim os processos envolvidos no tratamento térmico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Aquecimento de peça em fornos

A proposta deste trabalho é estimar os coeficientes de transferência de calor durante o aquecimento de uma amostra no interior de um forno mufla. A Figura 1 apresenta a peça no interior do forno trocando energia por convecção e radiação entre o meio e as paredes, respectivamente. Assim, o aquecimento da peça é resultado do balanço de energia absorvida e liberada em sua superfície.

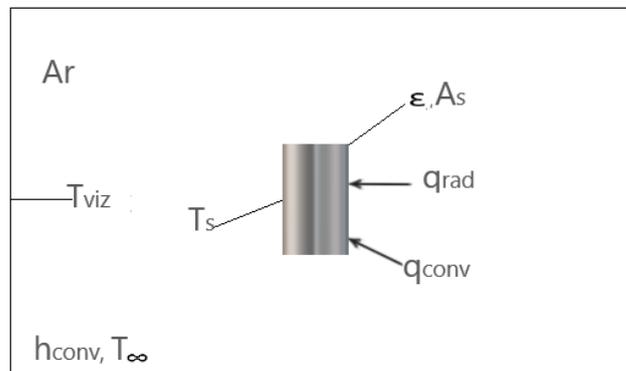


Figura 1. Desenho esquemático da configuração do experimento

Considera-se a superfície da peça de emissividade ε e a área superficial A_s a uma temperatura termodinâmica T_s completamente delimitada por uma superfície maior, no caso o forno, a uma temperatura termodinâmica T_{viz} separadas pelo o ar que não intervém na radiação. Dessa forma, com o objetivo de diminuir a complexidade do problema, pode-se considerar um coeficiente combinado de transferência de calor, ou seja, que inclui os efeitos da radiação e convecção. Assim, a taxa total de transferência de calor para superfície da peça por radiação e convecção pode ser expressa de acordo com Eq. (1)

$$q_{total} = q_{conv} + q_{rad} = h_{conv}A_s(T_s - T_{viz}) + \varepsilon\sigma A_s(T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (1)$$

onde os termos q_{total} , q_{conv} , q_{rad} , h_{conv} , A_s , T_∞ , T_s , ε , T_{viz} representam a taxa total de transferência de calor, taxa de transferência de calor por convecção, taxa de transferência de calor por radiação, coeficiente de transferência de calor por convecção, área superficial da amostra, temperatura do fluido no interior do forno, temperatura da peça no interior do forno, emissividade da peça em aquecimento, temperatura da vizinhança respectivamente $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} [W/(m^2K)]$

conhecida como constante de Stefan-Boltzmann. Simplificando para apenas um único coeficiente combinado de transferência de calor, a equação da taxa total de calor se torna:

$$q_{total} = h_{comb} A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (2)$$

O coeficiente combinado de transferência de calor é essencialmente um coeficiente de transferência de calor por convecção modificado para incluir os efeitos da radiação.

2.2. Método da Capacitância Global

Segundo Incropera *et al.* (2014), a essência do método da capacitância global é a hipótese de que a temperatura do sólido é uniforme no espaço, em qualquer instante durante o processo transiente. Essa hipótese implica que o gradiente de temperatura no interior do sólido seja desprezível. Pela Lei de Fourier, a condução térmica na ausência de um gradiente de temperatura torna-se infinita. No entanto, a condição é aproximada se a resistência à condução no interior do sólido for pequena em comparação à resistência à transferência de calor entre o sólido e a sua vizinhança. Sendo assim, a partir da Eq. 3 é possível realizar a estimativa do coeficiente combinado de transferência de calor.

$$h_{comb} = \frac{\rho V c_p}{t A_s} \ln \left(\frac{T_i - T_{\infty}}{T - T_{\infty}} \right) \quad (3)$$

onde os termos $\rho, V, c_p, t, A_s, T_i, T$ representam a densidade, o volume, calor específico, tempo de aquecimento, área superficial, temperatura inicial, e temperatura final da peça, respectivamente.

Para que a hipótese utilizada no método da capacitância global seja aceitável é preciso calcular o número de Biot, o qual representa a razão entre a resistência interna do sólido à condução de calor e sua resistência externa à convecção de calor. Assim, um pequeno número de Biot representa baixa resistência à condução de calor e gradiente de temperatura desprezível no interior dos sólidos. O número de Biot pode ser calculado a partir da Eq. 4 e a seguinte condição deve ser satisfeita

$$Bi = \frac{h_{comb} L_c}{k} < 0,1 \quad (4)$$

onde Bi representa o número de Biot, h é o coeficiente convectivo que neste trabalho usaremos o combinado, k é a condutividade térmica do material e Lc é o comprimento característico. O comprimento característico do sólido pode ser calculado a partir da Eq. 5 como sendo.

$$L_c = \frac{V}{A_s} \quad (5)$$

2.3. Convecção natural

Segundo Incropera *et al.* (2014), na convecção natural o movimento do fluido é devido as forças de empuxo no seu interior. O coeficiente combinado de transferência de calor no forno é composto pela convecção natural e pela radiação. A contribuição da transferência de calor por convecção natural no aquecimento de uma peça cilíndrica no interior do forno pode ser determinada a partir do número de Rayleigh, que depende do número de Grashof, Gr e do número Prandtl, Pr, como mostrado na Eq. 6.

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g \beta (T_s - T_{\infty}) L^3}{\nu^2} Pr = \frac{g \beta (T_s - T_{\infty}) L^3}{\nu \alpha} \quad (6)$$

onde g é a aceleração gravitacional, β é o coeficiente de expansão volumétrica (1/K), onde T_f é a temperatura de filme do ar que é dado por, $T_f = (T_s - T_{\infty})/2$, T_s é a temperatura da superfície, L é o comprimento do cilindro, ν é a viscosidade cinemática do fluido e α é a difusividade térmica do fluido.

Segundo Boetcher (2014), a correlação apropriada para o número de Nusselt envolvendo a transferência de calor por convecção natural em cilindros verticais para $10^4 \leq Gr_L Pr \leq 10^9$ pode ser expressa por

$$Nu_L = 0,59 * (Gr_L Pr)^{1/4} \quad (7)$$

sendo que para $Gr_L Pr = 10^3$, $Nu_L = 3,89$, e para $Gr_L Pr = 10^2$, $Nu_L = 2,63$. Nos experimentos deste trabalho, $Gr_L Pr \geq 10^4$ para o aquecimento até aproximadamente 300 s, e alcança 10^2 ao final do ensaio. Após a determinação do número de Nusselt, pode-se encontrar o coeficiente de transferência de calor por convecção natural através da Eq. 8 como sendo:

$$h_{conv} = \frac{k}{L} Nu_L \quad (8)$$

onde k representa o coeficiente condutividade térmica do fluido. O h_{conv} encontrado pela Eq. (8) representa a parcela de contribuição do aquecimento pela convecção natural. Vale ressaltar que a utilização do comprimento característico igual a L nas correlações de convecção natural é devido as expressões serem originadas de experimentos envolvendo placas verticais. Dessa forma, pode-se determinar a parcela de contribuição de aquecimento pela radiação através da Eq. (9).

$$h_{rad} = h_{comb} - h_{conv} \quad (9)$$

As propriedades termofísicas do ar foram consideradas em função da temperatura, e obtidas no apêndice do livro Incropera (2014).

2.4 Procedimento experimental

A Figura 2 apresenta o fluxograma que destaca as etapas para a realização dos experimentos, desde a preparação da amostra até a obtenção do coeficiente combinado de transferência de calor do forno.

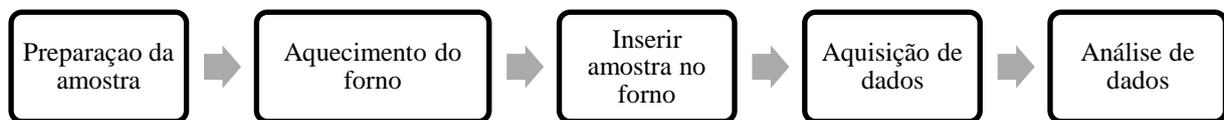


Figura 2. Fluxograma das etapas do procedimento experimental

Os experimentos foram realizados com o forno nas temperaturas de 300, 400, 500, 600, 700, 800 e 900°C. Para cada temperatura de forno, três repetições foram realizadas, totalizando 21 experimentos.

Na etapa de preparação da amostra, utilizou-se uma barra do aço AISI 5160 com 19 mm diâmetro e 50 mm de comprimento, logo após sua superfície foi escovada, e feito um furo de 3 mm de diâmetro e 9,5 mm de profundidade com uma broca de aço rápido. O furo está localizado no seu sentido radial e longitudinal onde será embutido o termopar. A Tabela 1 apresenta as propriedades térmicas do aço AISI 5160, e a Fig. 3 apresenta a influência da temperatura nas propriedades térmicas do aço.

Tabela 1. Propriedades térmicas do aço AISI 5160 a 300K (FUSHUN SPECIAL STEEL, 2022)

Propriedades	Valores	Unidades
Densidade	7850	Kg/m ³
Condutividade térmica	46,6	W/(mK)
Calor específico	443	J/ (kg. K)

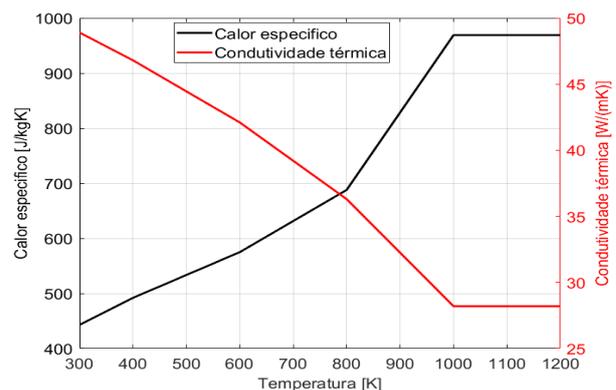


Figura 3. Variação das propriedades térmicas do aço AISI 5160 com o aumento da temperatura

O forno Mufla Q-318M24 da Quimis foi utilizado nos experimentos, o qual possui uma faixa de operação de 300 a 1200°C e um sensor termopar tipo K localizado no canto superior direito na parede do fundo (QUIMIS,2008). Após a configuração da temperatura desejada, esperou-se o forno aquecer e estabilizar na temperatura pré-configurada para a realização do experimento.

A colocação da peça no forno é uma etapa que requer atenção, pois o tempo que a porta do forno permanece aberta influencia diretamente no resultado final do experimento. A porta do forno possui um isolamento de 140 mm de espessura, a haste do termopar mede 230 mm de comprimento e o forno tem 300 mm de profundidade após o isolamento da porta, isso faz com que a ponta do termopar adentre de fato no forno apenas 90 mm conforme apresentado na Fig.4, onde buscou-se o tempo mínimo para inserir o conjunto dentro do forno após o alcance da temperatura pré-configurada.

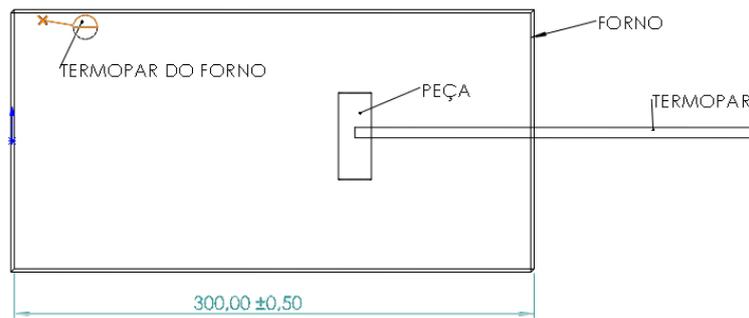


Figura 4. Peça inserida no forno

Na aquisição dos dados foi utilizado um sensor termopar tipo K com revestimento de inox para proteger os materiais (alumel e o cromel) à altas temperaturas. O termopar possui uma haste revestida de 3 mm de diâmetro, 230 mm de comprimento e cabo de 2 m. O sensor térmico é conectado diretamente ao sistema de aquisição de dados (FieldLogger) que permite acompanhar instantaneamente e armazenar a variação da temperatura ao longo do tempo.

A análise dos dados das temperaturas obtidas a cada 1 s durante um tempo total de 600 s foi realizada a partir de um algoritmo desenvolvido no software MATLAB para as estimativas dos coeficientes de transferência de calor e taxas de calor. Vale ressaltar que o tempo de 600 s foi escolhido com o objetivo de analisar o aquecimento da peça durante um intervalo de tempo significativo, para assim observar com maior qualidade o transporte de calor e a transformação de fase do material.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões dos experimentos realizados nas temperaturas de 300 à 900 °C são apresentados neste trabalho, com destaque principal para as análises do aquecimento do aço a 900 °C.

3.1 Forno à 900 °C

A Figura 5a apresenta as temperaturas para três repetições de experimentos com o forno configurado à 900 °C durante um tempo de 600 s. A evolução das temperaturas ao longo do tempo para os experimentos, foram semelhantes, mostrando a qualidade dos dados obtidos pelo termopar. Destaca-se aqui à existência da queda de temperatura do fluido nos instantes iniciais do experimento, devido abertura da porta do forno para inserir a peça, causando a perda de calor do sistema. A Figura 5b apresenta a média dos experimentos, mostrando que a peça aqueceu a partir da temperatura ambiente até aproximadamente 859,65 °C. Observou-se que entre os instantes 350 a 420 s na temperatura de 760 °C, a curva de aquecimento permanece constante, esse é um fenômeno conhecido como temperatura de transformação. Para Silva e Mei (2021), a transformação de fase não é algo instantâneo, é um processo que acontece por difusão, é isotérmico, ou seja, acontece em temperatura constante, a temperatura de transformação dos metais depende de sua composição química, da liga que o forma. Para o material em estudo, o AISI 5160, a temperatura de transformação de fase é de 760 °C, momento onde ocorre à austenitização da microestrutura do material.

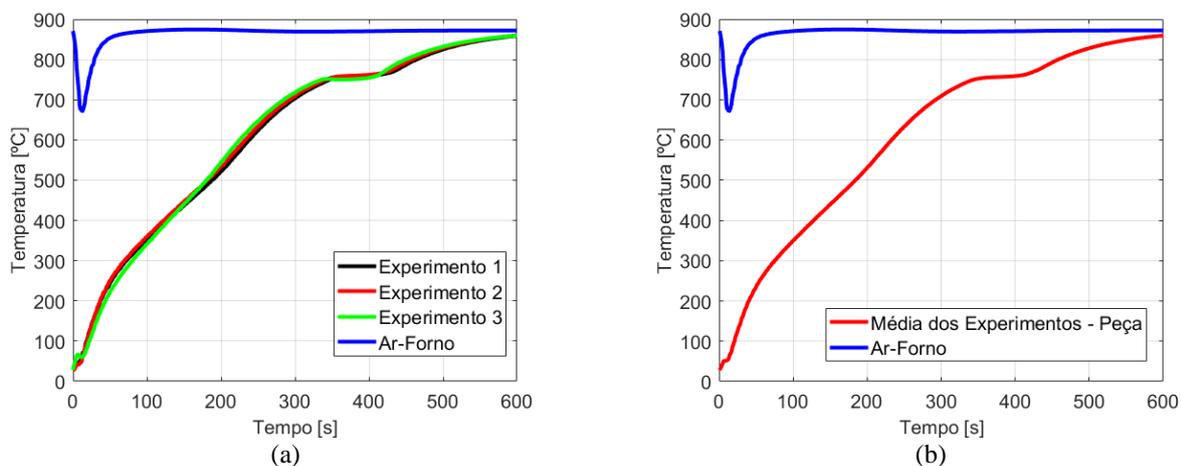


Figura 5. Temperatura da peça aquecida à 900 °C: (a) repetições dos experimentos e (b) média dos experimentos

A Figura 6a apresenta as estimativas dos coeficientes de transferência de calor combinado, radiação e convecção, destacando também a evolução da temperatura da peça durante o aquecimento à 900 °C. A Figura 6b apresenta os resultados após a aplicação do filtro média móvel com fator 10. Ainda assim, observa-se a presença de picos de ruídos entre os instantes iniciais até aproximadamente 20 s. Apesar da presença de ruídos, é possível determinar um coeficiente combinado de transferência de calor médio aproximado de 210,28 W/(m²K). Os coeficientes médios referentes a radiação e convecção foram iguais a 202,18 e 8,09 W/(m²K), respectivamente. Portanto, para este caso, percebeu-se uma contribuição muito maior da radiação em relação a convecção para o aquecimento da peça. A diminuição da contribuição da convecção foi observada com o aumento da temperatura da peça. Já a radiação apresentou contribuição na transferência de calor ao longo do tempo de aquecimento. Observou-se uma queda acentuada da radiação entre os instantes 320 a 420 s, isso é devido o material da peça atingir sua temperatura de transformação de fase, que é um processo isotérmico, ou seja, sem troca de calor entre a peça e o forno. Assim que o processo de austenitização da microestrutura do material completou, a peça voltou a trocar calor com o forno. O número de Biot calculado a partir do coeficiente combinado foi igual a 0,0214, sendo menor que 0,1, validando assim a utilização do método da capacitância global.

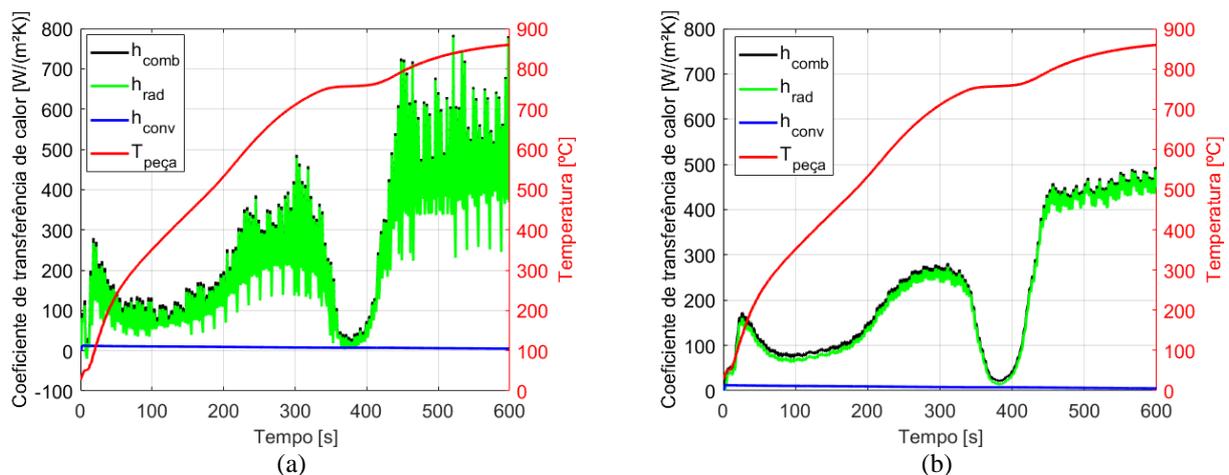


Figura 6. Coeficiente de transferência de calor do forno à 900 °C: (a) sem filtro e (b) com filtro

As Figuras 7a e 7b apresentam os resultados da taxa de transferência de calor combinada, por radiação e convecção sem e com filtro média móvel, respectivamente. Estes resultados mostram que a taxa de calor por radiação é maior que a parcela convectiva ao longo do experimento. Além disso, a magnitude das transferências de calor é alta no início do aquecimento, principalmente a taxa calor por radiação, mas diminuem ao longo do tempo devido a redução da diferença de temperatura entre a peça e o forno. Observou-se que a taxa de calor por convecção é desprezível a partir de aproximadamente 300 s de aquecimento. A taxa de calor por radiação aproxima-se de zero próximo aos 370 s. Isso ocorre por que a peça não absorve calor quando está acontecendo a transformação de fase, sendo a taxa de calor nesse intervalo de tempo tendendo a zero.

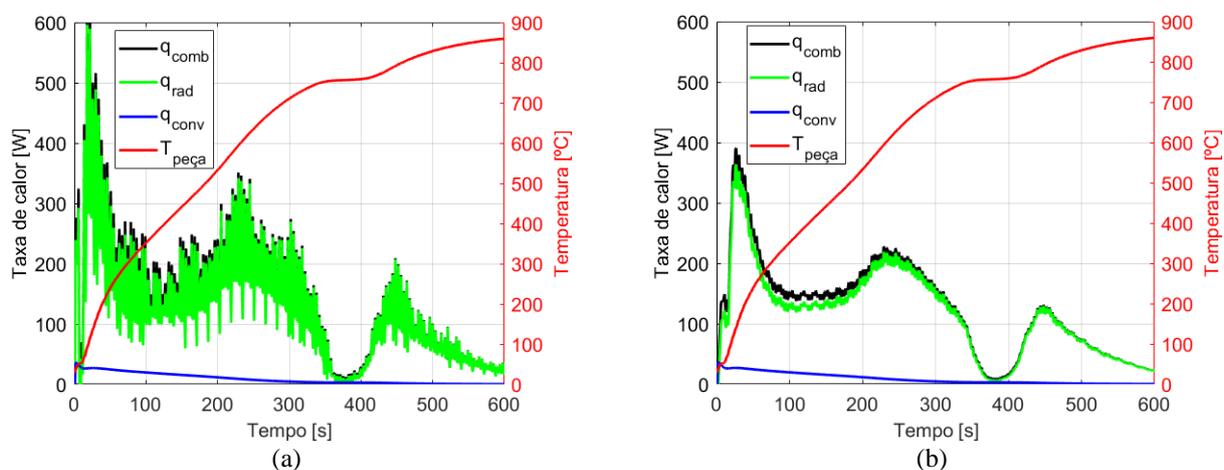


Figura 7. Taxa de calor para o forno à 900 °C: (a) sem filtro e (b) com filtro

3.2 Variação dos coeficientes de transferência de calor

A Figura 8a apresenta a influência da temperatura nos coeficientes de transferência de calor por radiação, convecção e combinado. O coeficiente de transferência de calor por convecção apresenta uma queda em sua contribuição no aquecimento com o aumento da temperatura do forno. Já o coeficiente de transferência de calor por radiação cresce com o aumento da temperatura do forno. Aumentando-se o tempo de permanência da peça em aquecimento e aumentando a temperatura do forno, a tendência é a radiação se tornar o único mecanismo significativo de transferência de calor no interior do forno. Lembrando que a estimativa do tempo de aquecimento de peças metálicas não depende unicamente do coeficiente combinado de transferência de calor do forno, mas também, das propriedades do material a ser aquecido, tais como: comprimento característico, densidade do material, calor específico do material, condutividade térmica do material e condições da superfície da peça. Todos esses fatores influenciam no tempo de aquecimento de uma peça metálica. A Figura 8b apresenta a variação da contribuição da radiação e da convecção em percentual no aquecimento do aço AISI5160 no forno mufla, para as setes temperaturas utilizadas durante os experimentos.

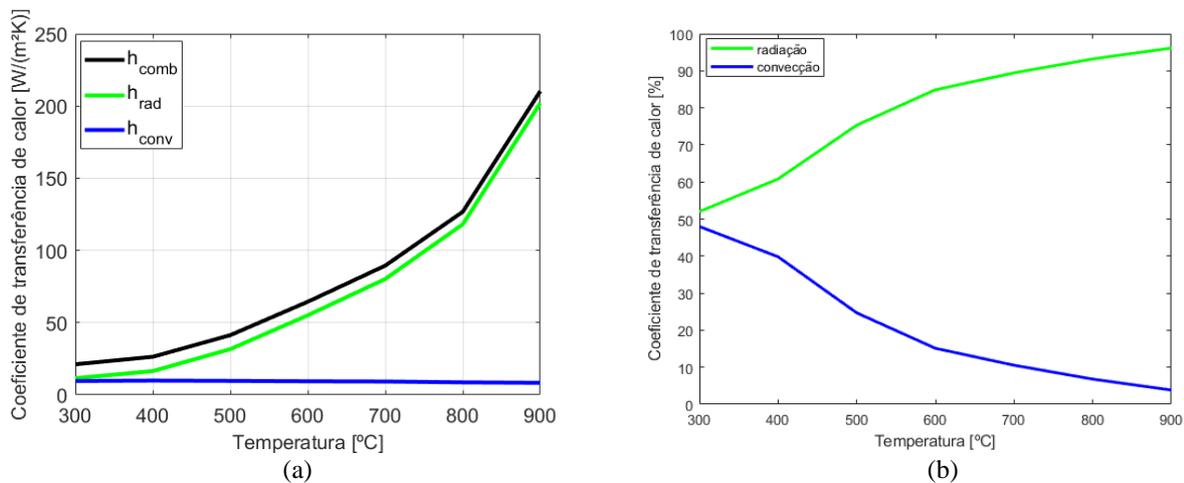


Figura 8. Influência da temperatura: (a) coeficiente combinado de transferência de calor e (b) percentual da contribuição da radiação e da convecção no aquecimento do aço AISI 5160 em um forno mufla

A Tabela 2 apresenta os coeficientes de transferência de calor determinados experimentalmente, a temperatura final alcançada pela peça, o número de Biot. Além disso, apresenta os percentuais da contribuição dos mecanismos de transferência de calor no aquecimento do aço AISI 5160 no interior de um forno mufla durante os 600 s.

Tabela 2. Resultados dos principais parâmetros estimados durante os experimentos

Temp. forno (°C)	Temp. final peça (°C)	Biot	h_{comb} (W/(m²K))	h_{conv} (W/(m²K))	h_{rad} (W/(m²K))	Contribuição no aquecimento (%)	
						Conv.	Rad.
300	158,33	0,0022	21,40	10,27	11,13	47,99	52,01
400	227,54	0,0027	26,35	10,49	15,85	39,81	60,19
500	345,70	0,0042	41,32	10,20	31,12	24,68	75,32
600	485,95	0,0066	64,49	9,75	54,74	15,12	84,88
700	613,03	0,0091	89,49	9,44	80,05	10,55	89,45
800	735,25	0,0129	126,75	8,62	118,13	6,80	93,20
900	859,65	0,0214	210,28	8,09	202,18	3,85	96,15

4. CONCLUSÃO

O trabalho realizado foi capaz de determinar os coeficientes de transferência de calor e a taxa de calor durante o aquecimento do aço AISI 5160 nas diferentes temperaturas configuradas para o forno mufla. Os resultados obtidos nos experimentos mostraram que o coeficiente combinado de transferência de calor é diretamente proporcional com o aumento da temperatura do forno e o tempo de permanência da peça em aquecimento.

O coeficiente de transferência de calor por convecção diminuiu com o aumento da temperatura do forno e tempo de permanência da peça em aquecimento, mostrando a tendência a se tornar desprezível com a elevação da temperatura. Em relação ao coeficiente de radiação, o mesmo aumenta significativamente com a temperatura do forno, tendendo a se tornar o único mecanismo significativo de transferência de calor.

As taxas de calor foram altas no início do aquecimento e diminuem com o passar do tempo, isto ocorre devido a diferença de temperatura entre o forno e a peça diminuírem durante o experimento. Por isso, as taxas de calor por convecção e radiação se tornaram desprezíveis ao longo do tempo de aquecimento em altas temperaturas. A taxa de calor por convecção a partir do experimento de 600 °C torna-se insignificante antes dos 600 s de aquecimento.

O tempo mínimo necessário para o aço AISI 5160 aquecido à 900 °C atingir a temperatura de transformação de fase foi de 320 s, e a austenitização da estrutura do material teve duração de 100 s. Um algoritmo capaz de calcular os coeficientes de transferência de calor combinado, radiação e convecção, assim como suas respectivas taxas de calor durante os experimentos foi desenvolvido no software MATLAB.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Ensaio Mecânicos e Metalografia da Universidade Estadual do Maranhão na pessoa do Prof. Dr. Adilto Cunha pelo suporte ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- BOETCHER, S.K.S. Natural Convection Heat Transfer From Vertical Cylinders. In: Natural Convection from Circular Cylinders. 2014. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology(). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08132-8_3.
- ÇENGEL, Yunus A. e GHAJAR, Afshin J. Transferência de calor e Massa: uma abordagem prática. 4. Ed. – Porto Alegre: AMGH, 2012.
- CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos: Características gerais, tratamentos térmicos principais tipos, 7. Ed. São Paulo: ABMMM, 2012.
- FUSHUN SPECIAL STEEL. Tudo sobre o aço 5160 (propriedades, resistência e uso). 2022.
- INCROPERA, Frank P. e DEWITT, David P. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 7. ed.- Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- JOACHIMIAK, Magda et al. Analysis of the heat transfer for processes of the cylinder heating in heat-treating furnace on the basis of solving the inverse problem. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 145, 2019.
- PINEDO, Carlos Eduardo. Tratamentos térmicos e superficiais do aços. – São Paulo: Blucher, 2021.
- QUIMIS. Manual de instruções forno mufla microprocessado. 2008.
- SARTORI, Carlos Humberto. Tratamentos térmicos de aços ferramenta. 2022. 26p. Gerente Industrial – Itaraí Metalurgia LTDA. Osasco, São Paulo.
- SILVA, André Luiz V. e; MEI, Paulo Roberto. Aços e ligas especiais. 4. ed. Ver.- São Paulo: Blucher, 2021.
- VALÉRIO, Bruna Guedes; BASTOS, Lucas Silva. Estudo da transferência de calor um forno mufla. 2016. 100p. Monografia (Bacharel) – Curso de Graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, Distrito Federal.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.