

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO AÇO-FERRAMENTA P20 ANTES E DEPOIS DO TRATAMENTO DE TÊMPERA E REVENIMENTO

Carla Daniela Peres Rodrigues, peres.carlarodrigues@gmail.com

Nícolas Pinheiro Ramos, nicolas@unifei.edu.br

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva, metrevell@unifei.edu.br

Laboratório de Transferência de Calor – LabTC, Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Campus Prof. José Rodrigues Seabra, Av. BPS, 1303, 37500-903, Itajubá, MG, Brasil.

Resumo. Este artigo apresenta uma análise da variação da condutividade térmica e do calor específico do aço-ferramenta P20 antes e após o processo de têmpera e revenimento. As propriedades térmicas foram estimadas resolvendo um problema inverso utilizando o método de otimização BFGS implementado em MATLAB. A estimativa das propriedades térmicas foi baseada na comparação entre temperaturas obtidas em um estudo transiente e tridimensional de condução de calor e dados numéricos gerados por simulações no COMSOL Multiphysics. O tratamento térmico do aço incluiu têmpera em água e revenimento. As amostras tratadas termicamente foram então submetidas a limpeza ultrassônica e análise metalográfica. Primeiramente, os parâmetros foram determinados para os materiais em estado normalizado. Em seguida, o procedimento de estimação foi repetido após o tratamento de endurecimento e alívio de tensões. As estimativas antes e depois do endurecimento, bem como suas respectivas incertezas, foram então comparadas, com a condutividade térmica sendo mais afetada.

Palavras chave: Problema inverso de condução de calor. Propriedades térmicas. Ligas metálicas. Têmpera e revenimento.

Abstract. This article presents an analysis of the variation in thermal conductivity and specific heat of P20 tool steel before and after the quenching and tempering process. The thermal properties were estimated by solving an inverse problem using the BFGS optimization method implemented in MATLAB. The estimation of thermal properties was based on a comparison between experimental temperatures obtained in transient and three-dimensional heat conduction studies and numerical data generated by simulations in COMSOL Multiphysics. The heat treatment of the steel included water quenching and tempering. The heat-treated samples were then subjected to ultrasonic cleaning and metallographic analysis. First, the parameters were determined for the materials in their normalized state. The estimation procedure was then repeated after the hardening and stress-relieving treatment. The estimates before and after hardening, as well their respective uncertainties, were then compared, with thermal conductivity being most affected.

Keywords: inverse heat conduction problem, thermal properties, metal alloys, quenching and tempering heat treatment

1. INTRODUÇÃO

A análise térmica de materiais metálicos é um aspecto crítico dentro da engenharia, uma vez que esses materiais são utilizados em larga escala em diversas aplicações industriais. Como as propriedades térmicas governam o comportamento térmico dos materiais, é imperativo um conhecimento preciso sobre tais propriedades para que estudos térmicos robustos sejam realizados. Em especial, dados adequados sobre a condutividade térmica e o calor específico de aços-ferramenta são fundamentais para otimizar processos de fabricação e garantir o desempenho eficaz de ferramentas utilizadas em operações de usinagem e conformação. Nesse contexto, solicitações térmicas podem afetar não apenas a eficiência, mas também a integridade do instrumental e dos componentes fabricados (JUNKES et al., 2020).

Os aços-ferramenta são conhecidos por suas propriedades mecânicas superiores, frequentemente aprimoradas através de tratamentos térmicos como a têmpera e o revenimento. Esses processos não apenas aumentam a dureza e a resistência ao desgaste dos materiais, mas também afetam significativamente seu comportamento térmico. A têmpera, que envolve o resfriamento rápido do metal após o aquecimento, resulta em uma estrutura martensítica que, embora ofereça alta resistência, também induz à fragilidade. O revenimento, por sua vez, é essencial para aliviar tensões internas e equilibrar dureza e ductilidade. Assim, compreender a relação entre a microestrutura resultante desses tratamentos térmicos e a resposta térmica dos materiais é essencial para o desenvolvimento de aços com desempenho otimizado.

O aço-ferramenta P20 é largamente utilizado na fabricação de moldes para injeção e sopro de plásticos, devido à sua boa usinabilidade, tenacidade e resposta aos tratamentos térmicos (RECH et al., 2004). Quando fornecido na condição

normalizada, o material apresenta uma microestrutura mais homogênea, com grãos refinados e distribuição uniforme de fases, o que favorece etapas posteriores de têmpera e revenimento. A normalização é particularmente importante quando se busca maior controle sobre as propriedades mecânicas finais, já que promove alívio de tensões internas e melhora a estabilidade dimensional. Com composição química contendo cromo, níquel e molibdênio, o P20 permite alcançar, após têmpera e revenimento, durezas superiores a 50 HRC, além de boa resistência ao desgaste, mantendo tenacidade satisfatória para aplicações em moldes de geometrias complexas (DAS et al., 2023).

Dentre os métodos tradicionais de medição de propriedades térmicas, destacam-se os experimentos em estado permanente e as técnicas calorimétricas. Embora confiáveis, esses métodos apresentam limitações, especialmente para materiais metálicos com alta condutividade e microestrutura não homogênea. Técnicas como o método da placa quente protegida são precisas, mas exigem longo tempo de teste e amostras específicas. Já a calorimetria de varredura diferencial (DSC) é eficaz na determinação do calor específico, mas não fornece diretamente a condutividade térmica. Métodos transientes, como o fio quente ou método flash, são mais rápidos, mas envolvem altos custos e equipamentos específicos.

Diante dessas limitações, a adoção de métodos alternativos, como os baseados em problemas inversos, torna-se uma estratégia viável. Esse tipo de abordagem permite a estimação de propriedades térmicas a partir de medições de temperatura ao longo do tempo. Esses dados medidos experimentalmente são então comparados com dados obtidos pela solução das equações governantes do problema físico, seja de maneira analítica ou numérica (BECK; ARNOLD, 1977). Assim, o uso de simulações numéricas em conjunto com dados experimentais, pode fornecer estimativas confiáveis da condutividade térmica de aços-ferramenta em diferentes estados.

Neste artigo apresenta-se uma investigação sobre a variação da condutividade térmica e do calor específico de aços-ferramenta antes e após o processo de têmpera e revenimento. A metodologia adotada inclui o tratamento térmico com têmpera em água seguida de revenimento, análise metalográfica e limpeza ultrassônica das amostras. Inicialmente, os parâmetros térmicos foram estimados para as amostras no estado normalizado, possibilitando uma comparação direta com os resultados após o tratamento térmico. O processo de estimação foi realizado por meio da resolução de um problema inverso, utilizando o método BFGS, com implementação numérica em MATLAB. As simulações computacionais foram conduzidas no COMSOL Multiphysics e comparadas com dados experimentais obtidos em ensaios de condução de calor. Análise de incertezas foi realizada para quantificar o erro causado por procedimentos experimentais e numéricos. Os resultados obtidos ressaltam a influência dos tratamentos térmicos sobre a condução de calor nos aços-ferramenta e reforçam a importância de abordagens experimentais e computacionais integradas para a caracterização térmica de ligas metálicas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Modelo térmico

A modelagem matemática da condução de calor transiente foi realizada considerando a geometria tridimensional real das amostras. Na Figura 1 mostra um esquema do modelo térmico adotado. A equação diferencial parcial que descreve o fenômeno de condução térmica tridimensional em regime transiente é expressa por:

$$k \nabla^2 T = \rho c_p \partial_t T \quad (1)$$

A condição inicial adotada assume temperatura homogênea no instante inicial:

$$T(t = 0) = T_0 \quad (2)$$

As condições de contorno foram definidas de acordo com a configuração experimental. Um fluxo de calor constante foi aplicado à região aquecida da superfície superior da amostra (Equação (3)), enquanto as demais superfícies foram tratadas como termicamente isoladas (Equação (4)). O contato entre aquecedor resistivo e amostra metálica foi considerado perfeito.

$$-k \partial_\eta T = q, \text{ na região aquecida da superfície superior} \quad (3)$$

$$-k \partial_\eta T = 0, \text{ em todas as outras superfícies} \quad (4)$$

onde x , y e z são as coordenadas cartesianas, k é a condutividade térmica, c_p é o calor específico, q é o fluxo de calor, t é o tempo, ρ é a massa específica do material, T é a temperatura, e η é a direção normal à superfície analisada. As propriedades térmicas são consideradas constantes ao longo do intervalo de temperatura testado.

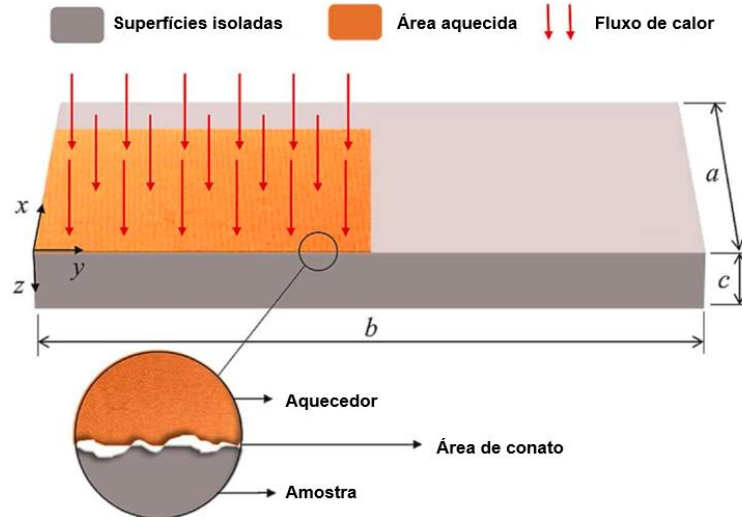


Figura 1. Representação do modelo térmico adotado.

2.2. Análise dos coeficientes de sensibilidade

Em problemas inversos de condução térmica, os coeficientes de sensibilidade representam a influência que pequenas variações nas propriedades térmicas exercem sobre as medições de temperatura. Coeficientes com elevada magnitude indicam maior sensibilidade da resposta térmica à propriedade em questão, o que favorece a precisão na sua estimativa. No entanto, quando os coeficientes apresentam correlação significativa entre si, o problema se torna mal condicionado, dificultando ou até impossibilitando a estimação simultânea das propriedades térmicas.

Com o objetivo de maximizar a eficiência do processo de estimativa, foi conduzido um estudo de sensibilidade para determinar as condições experimentais mais adequadas. No caso específico do aço-ferramenta P20, que possui condutividade térmica inferior à de metais de alta condutividade, como o alumínio, ainda assim podem ocorrer dificuldades na estimação simultânea de suas propriedades térmicas devido à possível correlação entre os coeficientes. Portanto, seguindo as bases estabelecidas por (RAMOS et al., 2022) investigou-se o comportamento dos coeficientes de sensibilidade na posição (2, 0, 8) mm.

Os coeficientes de sensibilidade para a condutividade térmica e para o calor específico são calculados por meio das seguintes expressões de diferenças finitas:

$$X_k = [T(k + \delta k, c_p) - T(k, c_p)]/\delta \quad (5)$$

$$X_{c_p} = [T(k, c_p + \delta c_p) - T(k, c_p)]/\delta \quad (6)$$

Em que X_k representa o coeficiente de sensibilidade em relação à condutividade térmica e X_{c_p} ao calor específico. O termo δ corresponde a uma pequena perturbação aplicada nas propriedades para avaliar sua influência sobre a temperatura simulada T .

Os cálculos foram realizados a partir de um código desenvolvido em MATLAB, acoplado ao COMSOL Multiphysics por meio do módulo LiveLink, permitindo a variação paramétrica das propriedades térmicas e o cálculo automático dos coeficientes de sensibilidade.

2.3. Estimação simultânea das propriedades térmicas

A determinação das propriedades térmicas dos materiais foi realizada de forma indireta, por meio da solução de um problema inverso (WOODBURY, 2002) baseado na comparação entre dados experimentais e resultados de simulações numéricas conduzidas no ambiente integrado MATLAB–COMSOL Multiphysics. Como as propriedades térmicas, como condutividade térmica e calor específico, não são diretamente mensuráveis, adotou-se uma metodologia que utiliza um modelo matemático descrevendo a condução de calor associado a uma técnica de otimização numérica.

A estimação foi conduzida por meio da minimização de uma função objetivo, definida como a soma normalizada do erro quadrático acumulado entre os valores de temperatura obtidos experimentalmente e aqueles simulados numericamente para um determinado par de propriedades térmicas:

$$S(k, c_p) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Y_i - T_i(k, c_p)]^2 \quad (7)$$

Em que Y representa os valores de temperatura medidos experimentalmente e $T(k, c_p)$ são os valores correspondentes obtidos nas simulações, e N é o número total de pontos no tempo considerados. Essa função quantifica a discrepância entre os dados reais e os valores simulados, permitindo avaliar a qualidade da estimativa das propriedades.

A minimização da função objetivo foi realizada utilizando o algoritmo de otimização BFGS (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno) (RAO, 2019), um método do tipo quasi-Newton reconhecido por sua eficiência e robustez na convergência para mínimos locais, mesmo na presença de ruído experimental e múltiplos parâmetros. A cada iteração do processo, o MATLAB atualizava os valores estimados de k e c_p , executava a simulação no COMSOL por meio da interface LiveLink, e extraía os resultados para o recálculo da função objetivo. Esse ciclo foi repetido iterativamente até que a convergência fosse alcançada, isto é, até que as temperaturas simuladas se aproximassem suficientemente dos valores experimentais.

2.4. Análise de incertezas

As medições de temperatura usadas para resolver o problema inverso foram obtidas usando termopares, que, como qualquer instrumento de medição, inerentemente apresentam variabilidade em suas respostas. Além disso, outros parâmetros usados como dados de entrada no modelo térmico desenvolvido no COMSOL foram medidos previamente. Dentre eles estão a resistência elétrica do aquecedor, a corrente elétrica fornecida pela fonte de energia, a massa e as dimensões das amostras. Nesse mesmo contexto, os métodos numéricos usados para realizar a estimativa simultânea também não produzem respostas exatas, pois a concepção de tolerância de convergência é inerente a eles. A análise de incertezas leva em conta fontes de erros experimentais e computacionais, e quantifica os erros e incertezas da estimativa (RAMOS et al., 2022).

A incerteza total associada aos resultados da estimativa (U_{total}) pode ser obtida pela soma quadrática dos erros independentes da temperatura numérica (U_T), da temperatura medida (U_Y) e da tolerância do método BFGS (U_{BFGS}). A expressão a seguir mostra todas as fontes de erro consideradas ao quantificar a incerteza total relacionada à estimação das propriedades térmicas.

$$U_{total} = (U_{resistência}^2 + U_{corrente}^2 + U_{massa}^2 + U_{dimensões}^2 + U_{PARDISO}^2 + U_{BDF}^2 + U_{termopar}^2 + U_{aquisição}^2 + U_{isolamento}^2 + U_{BFGS}^2)^{1/2} \quad (8)$$

$$U_{total} = \left[\left(\frac{0.1}{330} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{0.4} \right)^2 + \left(\frac{0.1}{470} \right)^2 + \left(\frac{0.05}{56.7} \right)^2 + \left(\frac{10^{-8}}{77} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{77} \right)^2 + \left(\frac{0.1}{77} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{77} \right)^2 + \left(\frac{0.7}{77} \right)^2 + \left(\frac{10^{-10}}{77} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.03\% \quad (9)$$

Os termos contidos na expressão de U_{total} são incertezas relativas. Para obtê-las, as tolerâncias dos métodos numéricos e as resoluções dos instrumentos de medição foram consideradas como incertezas individuais. Em seguida, dividiu-se cada incerteza individual pelo valor médio do parâmetro analisado, com exceção da temperatura, para a qual foi considerada sua variação máxima.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram utilizadas amostras retangulares do aço-ferramenta P20, previamente normalizadas e depois temperadas e revenidas, com dimensões de 100,0 × 60,0 × 10,0 mm. Para cada condição de tratamento, foram realizados cinco experimentos.

O aquecimento das amostras foi promovido por um aquecedor resistivo de 50 × 50 mm e 330 Ω, posicionado em uma das extremidades da face superior da amostra, de modo a garantir uma condição de transferência de calor tridimensional. O fluxo de calor aplicado foi constante, com intensidade de cerca de 20000 W/m² durante 300 segundos. No entanto, para fins de cálculo, foi aplicada uma correção de 10% nesse valor, com o objetivo de considerar as perdas térmicas para o ambiente. Tais perdas decorrem da eficiência limitada do isolamento térmico e da montagem assimétrica do experimento, que favorece dissipações de calor superiores às observadas em configurações simétricas.

A medição da temperatura foi realizada com um termopar do tipo T, instalado na face lateral da amostra, na posição (2, 0, 8) mm, próxima à base, em uma região adjacente à zona de aplicação do aquecimento. Essa posição foi escolhida estrategicamente por oferecer maior sensibilidade térmica e precisão nos resultados. Os dados de temperatura foram registrados por um sistema de aquisição conectado a um microcomputador, permitindo a coleta e a análise contínua do comportamento térmico dos materiais.

As amostras foram acondicionadas em um recipiente de isopor de alta densidade, preenchido com fibra cerâmica em pó compactado, a fim de promover vedação térmica e aumentar a eficiência do isolamento. A tampa do sistema, também confeccionada fibra cerâmica, foi comprimida por fixadores, assegurando pressão de contato adequada e estabilidade térmica durante os experimentos. Os parâmetros experimentais foram definidos com base em análises de sensibilidade, com o objetivo de maximizar a eficiência da metodologia e garantir que as medições fossem representativas das propriedades térmicas dos materiais ensaiados.

A normalização foi realizada com o objetivo de refinar os grãos e homogeneizar a microestrutura do material antes da têmpera (XIAO et al., 2024). As amostras foram aquecidas em forno elétrico até a temperatura de 850 °C, mantidas por 1 hora para garantir a completa austenitização, e posteriormente resfriadas ao ar calmo. Para a têmpera, as amostras foram aquecidas a 850 °C, mantidas por 30 minutos, e então resfriadas rapidamente em óleo térmico; Como a estrutura formada após a têmpera é excessivamente dura e frágil, o revenimento é necessário para aliviar tensões internas e melhorar a tenacidade. O processo consistiu em aquecer a amostra a 550 °C por 2 horas, seguido de resfriamento ao ar.

4. SIMULAÇÃO TÉRMICA

A geometria tridimensional das amostras foi modelada no software COMSOL Multiphysics, utilizando suas dimensões reais para representar fielmente as condições experimentais. Para a solução numérica do problema direto de condução de calor em regime transiente, empregou-se o módulo "Heat Transfer in Solids", conforme a formulação matemática apresentada na seção anterior.

A malha computacional foi composta por elementos tetraédricos (Figura 2), com distribuição estruturada. A malha foi refinada a fim de capturar com maior precisão os gradientes térmicos. Essa abordagem garante maior fidelidade na simulação dos fenômenos de condução de calor e melhora a acurácia dos resultados. O processo de geração da malha também levou em consideração o custo computacional associado às iterações do problema inverso, estabelecendo um equilíbrio entre precisão numérica e tempo de simulação.

Os valores iniciais das propriedades térmicas foram definidos com base em valores médios encontrados na literatura técnica para o material estudado. Esses valores serviram como ponto de partida para os ensaios numéricos e foram posteriormente ajustados por meio do processo de estimação inversa de propriedades.

A integração entre o modelo de simulação no COMSOL Multiphysics e o código de otimização no MATLAB foi realizada por meio do módulo LiveLink, permitindo a automação do processo iterativo de estimação. Essa comunicação direta entre os dois ambientes possibilitou a atualização dinâmica dos parâmetros térmicos a cada iteração do algoritmo de otimização, garantindo a convergência da solução numérica com os dados experimentais de temperatura obtidos.

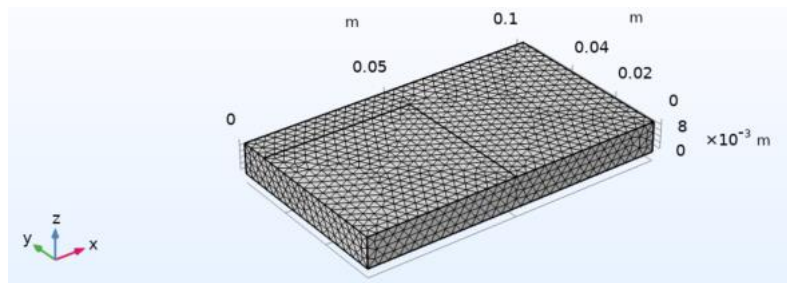


Figura 2. Malha adotada na simulação numérica.

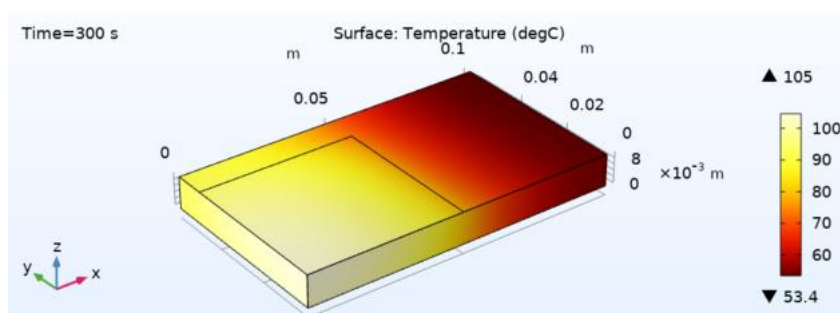


Figura 3. Distribuição de temperatura na superfície do modelo.

5. RESULTADOS

A Figura 4 apresenta os coeficientes de sensibilidade associados à condutividade térmica e ao calor específico para o aço-ferramenta analisado. Observa-se que os coeficientes apresentam comportamentos distintos, sem evidenciar correlação significativa entre si, o que indica a viabilidade da estimação simultânea das propriedades térmicas. Boa

magnitude e a ausência de correlação reduz o risco de instabilidades numéricas e contribui para o bom condicionamento do problema inverso.

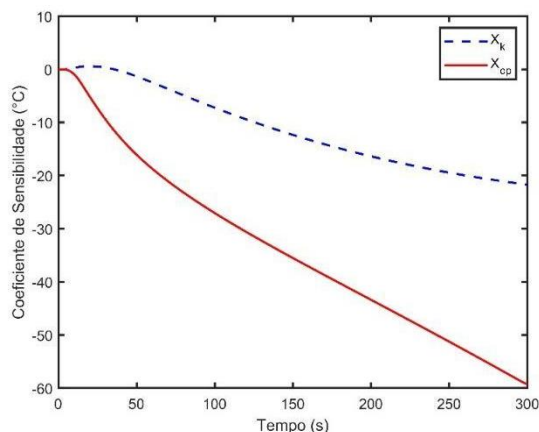


Figura 4. Coeficientes de sensibilidade.

A Figura 5 mostra os perfis de temperatura obtidos para as duas condições testadas: normalizada; e temperada e revenida. Nota-se que os perfis são bem similares, sendo que o maior resíduo para a condição temperada e revenida é de 0,7°C, enquanto esse respectivo valor para a condição normalizada é de 0,4°C. Conforme a Figura 6, os resíduos entre temperatura experimental e temperatura numérica apresentam, para ambos os casos, um comportamento com certo grau de assinatura, mas com baixa magnitude. Ainda analisando a Figura 5, pode-se observar uma temperatura máxima maior obtida para a condição normalizada. Isso evidencia um valor maior de condutividade do material nessa condição, o que é comprovado ao se analisar a Tabela 1 que apresenta os resultados do processo de estimação. Nessa tabela, pode-se observar que o tratamento térmico impactou, sobretudo, a condutividade, que tem seu valor reduzido em mais de 10%. Já o calor específico varia positivamente em torno de apenas 1%. A análise de incertezas mostra que as estimativas têm erro menor que 1%.

As alterações observadas, principalmente em relação a k , foram correlacionadas com possíveis transformações microestruturais decorrentes da têmpera e do revenimento, como mudanças na fração de fases, presença de martensita, revenido de carbonetos e alívio de tensões internas. Isso se comprova ao analisar a Figura 7, que mostra a metalografia do aço P20 com ataque de nital e zoom de 500x. Pode-se observar uma microestrutura típica de martensita revenida (estrutura acicular clara na imagem) e, possivelmente, ferrita residual. A textura acicular que domina a imagem é característica da martensita revenida, com orientação variada, formando um padrão entrelaçado. Não há evidência clara de perlita, indicando que o tratamento térmico foi bem-sucedido para endurecimento. Também não se observam carbonetos grandes, o que é consistente com revenimento adequado. Os carbonetos finos precipitados durante o revenido não são facilmente visíveis nesta ampliação com nital, mas são os principais responsáveis pela queda na condutividade térmica (KLEIN et al., 2016). Portanto, a menor condutividade térmica observada no aço P20 temperado e revenido, como evidenciado pela micrografia, está diretamente ligada à predominância de martensita revenida, uma fase menos eficiente na condução de calor do que a ferrita e a perlita presentes em aços normalizados. Esse fator é importante, por exemplo, no desempenho térmico de moldes para injeção de plásticos, onde a dissipação de calor pode ser crítica. O material testado apresentou dureza de 53 HRC após o tratamento térmico.

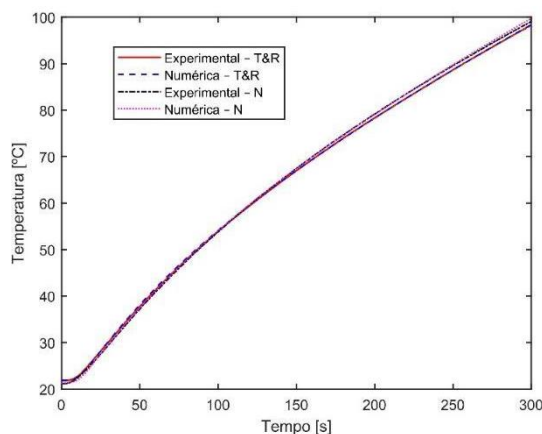


Figura 5. Comparação do campo de temperatura do aço-ferramenta P20 sujeito a diferentes tratamentos térmicos.

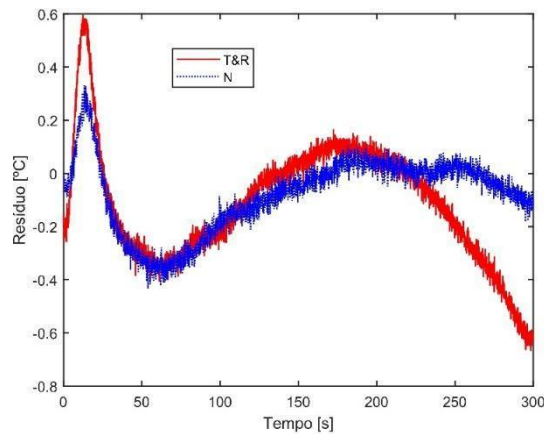


Figura 6. Resíduos entre temperaturas experimentais e numéricas.

Tabela 1. Propriedades térmicas estimadas para o aço-ferramenta P20.

Tratamento térmico do aço-ferramenta P20	Condutividade térmica [W/(m.K)]	Calor específico [J/(kg.K)]
Normalização	40,7	538,5
Temperado e revenido	36,3	544,2

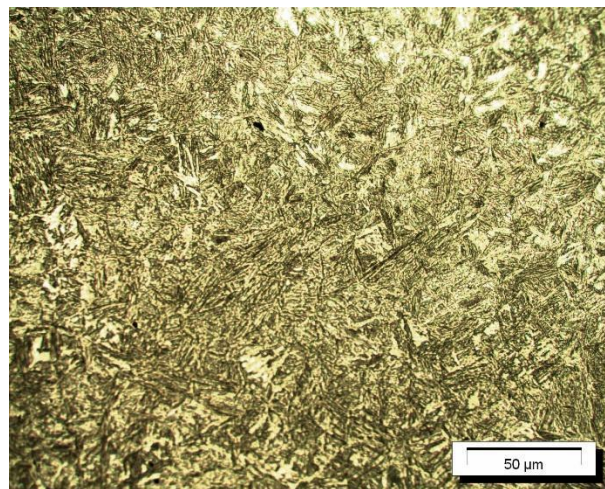


Figura 7. Metalografia do aço P20 temperado e revenido mostrando uma microestrutura martensítica.

A Figura 7 mostra curvas de resíduo térmico (diferença entre a temperatura experimental e a temperatura numérica) em função do tempo, para dois tratamentos térmicos distintos aplicados ao aço P20. A análise dos resíduos térmicos mostra que a condição normalizada apresentou melhor concordância entre os dados experimentais e numéricos ao longo de todo o processo térmico, com menores amplitudes de erro. Em contraste, a amostra tratada com têmpera e revenimento revelou maior discrepância, especialmente nas fases inicial e final, possivelmente devido a alterações nas condições de contorno (isolamento não perfeito) propriedades térmicas que não foram completamente capturadas pelo modelo.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho investigou a influência do tratamento térmico de têmpera e revenimento sobre as propriedades térmicas do aço-ferramenta P20, utilizando uma abordagem integrada entre experimentos térmicos e simulações numéricas baseadas em problemas inversos. A metodologia empregada permitiu estimar simultaneamente a condutividade térmica e o calor específico do material em duas condições distintas: normalizado e temperado/revenido. Os resultados obtidos demonstraram que a condutividade térmica foi significativamente afetada pelo tratamento térmico, apresentando uma redução superior a 10% na condição temperada e revenida em comparação com o estado normalizado. Essa diminuição foi associada à transformação microestrutural observada, evidenciada por análise metalográfica, que revelou a

predominância de martensita revenida, estrutura caracteristicamente menos eficiente na condução de calor em comparação à ferrita e perlita presentes na condição normalizada. O calor específico, por outro lado, apresentou variação marginal, inferior a 1,5%, indicando que essa propriedade é menos sensível às transformações estruturais induzidas pelos tratamentos térmicos avaliados. A análise de sensibilidade confirmou a viabilidade da estimação simultânea dos parâmetros térmicos, e os resíduos térmicos obtidos entre dados experimentais e simulados indicaram boa concordância, especialmente para a condição normalizada. A análise de incerteza mostrou um erro menor que 1% derivado dos procedimentos experimentais e numéricos. Os achados deste estudo reforçam a importância de considerar os efeitos microestruturais na caracterização térmica de ligas metálicas, especialmente em aplicações onde o desempenho térmico é crítico, como no caso de moldes para injeção de plásticos.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro. Agradecem, em especial, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão de bolsa de iniciação científica.

8. REFERÊNCIAS

- BECK, J.V., ARNOLD, K.J., 1977. *Parameter Estimation in Engineering and Science*. Wiley, New York, USA, 501 p.
- DAS, K.; SEN, S.; JOSEPH, A.; GHOSH, A.; BISWAS, K.; MUKHERJEE, S.; GHOSH, M. Investigation on the effects of pretreatment on the surface characteristics of duplex plasma-treated AISI P20 tool steel. *Materialia*, v. 27, p. 101679, 2023.
- INCROPERA, F.P., BERGMAN, T.L., DEWITT, D.P., 2008. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. LTC, Rio de Janeiro.
- JUNKES, R.; HOWARTH, J. L. L.; BECKER, D.; BOND, D. Properties evaluation of semi-crystalline and amorphous polymers injected in AISI P20 molds repaired by welding. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 3, 2020.
- KLEIN, S., MUJICA RONCERY, L., WALTER, M., THEISEN, W., WEBER, S. Diffusion processes during cementite precipitation and their impact on electrical and thermal conductivity of a heat-treatable steel. *Journal of Materials Science*, v. 52, n. 1, p. 375–390, 2017.
- RAMOS, N.P., ANTUNES, M.M., GUIMARÃES, G., LIMA E SILVA, S.M.M., 2022. Simultaneous Bayesian estimation of the temperature-dependent thermal properties of a metal slab using a three-dimensional transient experimental approach. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 179, p. 107671–107671, 7 maio.
- RAO, S. S. *Engineering Optimization: Theory and Practice*. Nova Iorque: Wiley, 2009.
- RECH, J. Le Calvez, C. e Dessoly, M., 2004. A new approach for the characterization of machinability—application to steels for plastic injection molds. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 152, n. 1, p. 66–70.
- WOODBURY, K.A. (Ed.), 2002. *Inverse Engineering Handbook*. In *The Mechanical Engineering Handbook Series*. CRC Press.
- XIAO, B.; YU, Y.; HU, B.; WANG, H.; WANG, W.; LIU, S.; LIU, W. Insights into the role of retained austenite stability in TRIP-aided steel: Ductilizing and toughening. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 33, p. 7698–7708, 2024.

9. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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