

EFEITOS NA MICROESTRUTURA E DUREZA DE AÇO DE MÉDIO TEOR DE CARBONO SUBMETIDOS A DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS

Data de aceite: 01/12/2023

Lucas Henrique Soares Quirino

Instituto Federal do Paraná

Murillo Garcia Gentil

Instituto Federal do Paraná

Ricardo Breganon

Instituto Federal do Paraná

Rogério Breganon

Instituto Federal do Paraná

Carla Kozuki

Instituto Federal do Paraná

Gustavo Henrique Bazan

Instituto Federal do Paraná

Gustavo Vendrame Barbara

Instituto Federal do Paraná

Felipe Augusto de Aguiar Possoli

Instituto Federal do Paraná

Uiliam Nelson Lenzion Tomaz Alvez

Instituto Federal do Paraná

André Luiz Salvat Moscato

Instituto Federal do Paraná

Luis Fabiano Barone Martins

Instituto Federal do Paraná

Fernando Sabino Fonteque Ribeiro

Instituto Federal do Paraná

RESUMO: Os aços desempenham um papel fundamental na sociedade devido às diversas aplicações que possuem. Em certas circunstâncias, é essencial empregar métodos de tratamento térmico para aprimorar as características mecânicas dos aços, tendo em vista que os diferentes percentuais de carbono podem permitir o aumento ou diminuição da resistência mecânica e da dureza, quando necessário. Isto posto, o presente artigo tem como objetivo avaliar a dureza e a as diferentes microestruturas do material, após os tratamentos térmicos de têmpera, revenimento e recozimento. Como resultado, foram obtidas variações na microestrutura condizentes com a bibliografia, sendo corroborado pelos valores de dureza encontrados.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento térmico. Aço SAE 1045. Microestrutura. Dureza.

MICROSTRUCTURE AND HARDNESS EFFECTS ON MEDIUM-CARBON STEEL SUBJECTED TO DIFFERENT HEAT TREATMENTS

ABSTRACT: Steels play a fundamental role in society due to the diverse applications they have. In certain circumstances, it is essential to employ heat treatment methods to improve the mechanical characteristics of steels, considering that different percentages of carbon can allow the increase or decrease in mechanical resistance and hardness, when necessary. That said, this article aims to evaluate the hardness and different microstructures of the material, after heat treatments of quenching, tempering and annealing. As a result, variations in the microstructure were obtained, consistent with the literature, corroborated by the hardness values found.

KEYWORDS: Heat Treatment. SAE 1045 steel. Microstructure. Hardness.

INTRODUÇÃO

À medida que se observaram avanços nas diferentes aplicações dos aços, constatou-se que esses materiais exibiam propriedades mecânicas particulares. No entanto, ao serem submetidos a procedimentos de tratamento térmico, consistindo em aquecimento e resfriamento controlados, essas propriedades sofriam modificações significativas e repercutiam no uso final do material (Vale, 2011). Dentre as classes dos aços, o aço SAE 1045 é tipicamente categorizado como um aço com teor de carbono intermediário (Tabela 1) com elevada aplicação industrial, devido sua notável resistência mecânica (Chiaverini, 1986), conforme Tabela 2.

Elemento	C	Mn	S	P	Fe
SAE 1045	0,420-0,50	0,60-0,90	0,050	0,040	98,51-98,98

Tabela 1: Composição química do aço SAE 1045 (Ibrahim *et al*, 2015).

Condição	Resistência a tração (MPa)	Energia de impacto Charpy (J) entalhe V.
Não tratada	742	150
Recozida	650	140
Temperada	725	144

Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço SAE 1045 (Singh *et al*, 2021).

Os materiais são constituídos por estruturas que consistem em arranjos atômicos que resultam em configurações estruturais conhecidas como células unitárias, frequentemente assumindo a forma cúbica, hexagonal, ortorrômbica e tetragonal. Quanto a estruturação cúbica, é comum as formas identificadas como cúbica de corpo centrado ou cúbica de face centrada (Callister, 2002). Os aços são compostos por ligas de ferro e carbono (Fe-

C), e a estrutura cúbica desses materiais sofre transformações devido às mudanças na organização dos átomos que ocorrem durante os processos de aquecimento e resfriamento (Vlack, 2000).

O tratamento térmico oferece a capacidade de alterar as propriedades mecânicas dos aços de acordo com as exigências específicas de cada aplicação, sendo comum o aumento da dureza, aprimoramento da ductilidade e outras melhorias (Chiaverini, 2008). Essa modificação nas propriedades mecânicas é sensível ao tipo de processo utilizado, bem como à temperatura de aquecimento, taxa de resfriamento, tempo de exposição ao calor e às condições estruturais do aço (Chiaverini, 2005).

As alterações nas propriedades mecânicas dos aços podem ser avaliadas por meio de ensaios específicos, como o ensaio de dureza. No entanto, também é fundamental considerar a observação por meio do processo de metalografia, que possibilita a análise da microestrutura, permitindo não apenas a avaliação do comportamento esperado do material, mas também a investigação da sua organização estrutural (Colpaert, 2008).

Isto posto, o presente estudo tem como objetivo verificar como as microestruturas do aço SAE 1045 são modificadas em processos de tratamento térmico de têmpera, revenimento e recozimento, frente a comparação a condição original do material, correlacionando estes dados a avaliação da dureza dos materiais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo, foram utilizadas amostras de aço SAE 1045 laminado. As amostras foram cortadas com auxílio de uma serra fita G4025 Bda marca Eurostec, com uso de fluido de corte Quimatic ME-1 em diluição de 1:40, visando não gerar alterações microestruturais devido ao aquecimento durante o corte. Foram cortadas seções de 12 mm de espessura para cada uma das condições avaliadas. A amostra de aço utilizada neste trabalho é representada na Figura 1.



Figura 1: Amostra de aço SAE 1045.

Quatro padrões para investigação foram adotados, sendo a condição original do material em questão, a condição com têmpera, com revenimento e com recozimento. Tratando-se de um material comercial, foram seguidas as instruções fornecidas pela empresa GGD Metais (2023). Os procedimentos sugeridos pelo fornecedor são:

Recozimento: O tratamento deve ser feito na temperatura próxima de 800 – 850°C por no mínimo 1 hora para cada 25 mm. Resfriar lentamente no forno.

Têmpera: Austenitizar em temperatura entre 820 – 850°C. Aquecer por 1 hora para cada 25 mm de espessura. Resfriar em água ou solução polimérica. Para resfriamento em óleo (seções menores do que 10 mm) temperar a partir de 840 – 860°C.

Revenimento: Deve ser realizado imediatamente após a têmpera quando a temperatura atingir cerca de 70°C. A temperatura de revenimento deve ser selecionada de acordo com a dureza especificada para o componente. Para isto utilizar a curva de revenimento orientativa, conforme Figura 2. Manter na temperatura de revenimento por no mínimo 1 hora para cada 25 mm de espessura e utilizar no mínimo por duas horas. Resfriando em ar calmo.

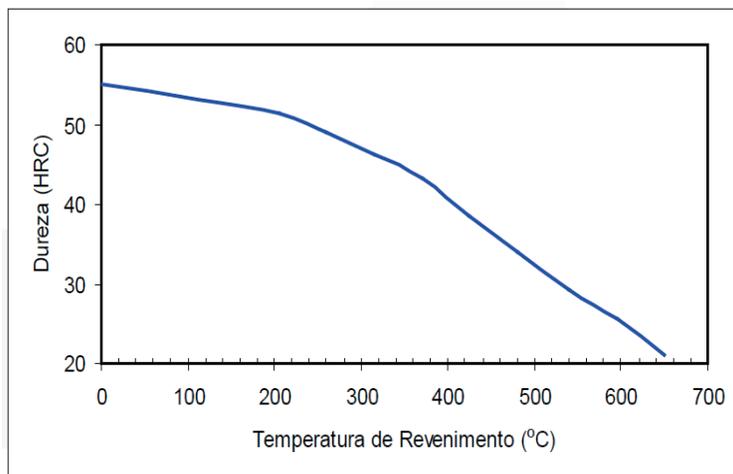


Figura 2: Curva de revenimento. Têmpera a partir de 850°C (GGD Metais 2023).

Para a realização dos tratamentos térmicos, um forno mufla da marca Solidsteel foi utilizado, como indicado na Figura 3. Seguindo os parâmetros recomendados anteriormente, as amostras foram submetidas aos tratamentos térmicos de têmpera, têmpera seguida por revenimento a 600°C e recozimento, sendo utilizada a água em temperatura ambiente para resfriamento nos casos da têmpera.



Figura 3: Forno mufla aplicado aos ensaios.

Realizados os procedimentos de tratamento térmico, as amostras receberam a preparação metalográfica. Foram realizados cortes com uma cortadora metalográfica da marca Fortel, modelo CFI 40, utilizando fluido de corte LRF em diluição de 1:4. Em seguida, as amostras foram embutidas em baquelite com uma embutidora EM 40D, fabricado pela Teclago. Após essa etapa, foi realizado o lixamento com lixas de granulometria variando de 80 a 2500 mesh, seguido pelo polimento com pasta de diamante de 6, 3 e 1 μm , sendo que ambos os processos de lixamento e polimento foram realizados em uma lixadeira politriz de velocidade variável modelo PVV, da fabricante Teclago. Por fim, após a limpeza, as amostras foram submetidas ao ataque químico da superfície polida em solução Nital 2% (2% de HNO_3 + 98% de $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$). Utilizando-se de um microscópio ótico Kontrol, modelo IM 100i e uma câmera digital, foram efetuadas imagens com ampliações de até 400x. A Figura 4 apresenta os equipamentos utilizados para o procedimento metalográfico.



Figura 4: Equipamentos utilizados: a) Cortadora metalográfica; b) Embutidora metalográfica; c) Lixadeira e poltriz; d) Microscópio ótico.

Em busca de evidências sobre o aumento ou não da resistência mecânica das amostras submetidas a diferentes tratamentos térmicos, medições da dureza foram realizadas. Utilizando um durômetro digital modelo HR-300, da marca Mitutoyo, obteve-se o valor médio correspondente a 5 medições em diferentes regiões de cada amostra. Ressalta-se que para a medição da dureza, foram utilizadas seções das amostras que não foram submetidas ao processo metalográfico, sendo realizada a devida remoção dos óxidos superficiais com auxílio de uma escova de aço. A medição da dureza foi realizada utilizando o equipamento mostrado na Figura 5.



Figura 5: Equipamento de medição de dureza com durômetro HR-300.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As amostras submetidas ao procedimento de embutimento, polimento e ataque químico são apresentadas na Figura 6. Com base nas imagens efetuadas, foi possível avaliar a morfologia das amostras de aço SAE 1045, variando de acordo com o processo de tratamento térmico empregado.

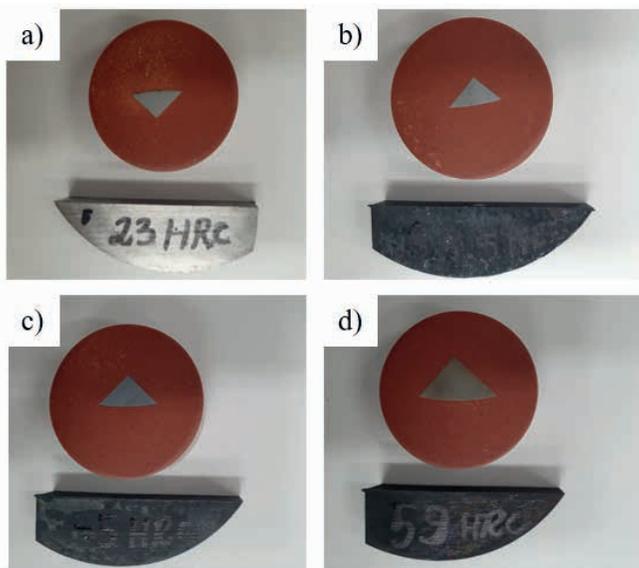


Figura 6: Amostras aplicadas no trabalho: a) Estrutura original; b) Temperada e revenida; c) Recozida; d) Temperada.

Conforme observado, a amostra não tratada termicamente revelou uma microestrutura martensítica revenida em alta temperatura, conforme representado na Figura 7, característica essa comum em aços hipoeutetóides, particularmente aquelas com teores moderados de carbono que passaram por um ciclo térmico que permitiu a formação de martensita (Colpaert, 2008).

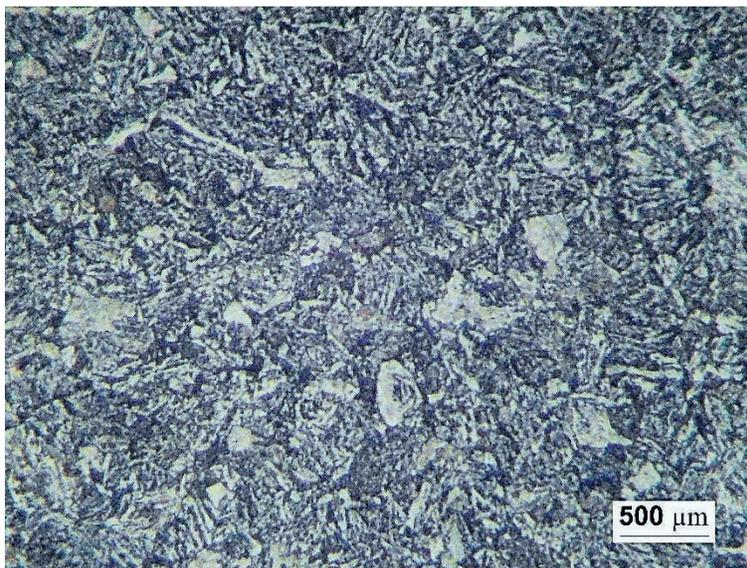


Figura 7: Metalografia da amostra na condição original de fornecimento.

Nas amostras submetidas ao tratamento térmico de têmpera seguido por revenimento, verifica-se a microestrutura apresentada na Figura 8. A têmpera é um tratamento térmico que envolve o aquecimento do aço a uma temperatura crítica, denominada temperatura de austenitização e, em seguida, resfriamento rápido. Isso produz uma microestrutura extremamente dura e frágil chamada de martensita, caracterizada por apresentar uma estrutura alongada, em forma de agulha (Silva, 2021). Durante o revenimento, ocorre uma transformação da martensita em uma mistura de ferrita e perlita, melhorando a tenacidade do aço, tornando-o menos quebradiço e mais adequado para aplicações em que a resistência mecânica é importante.

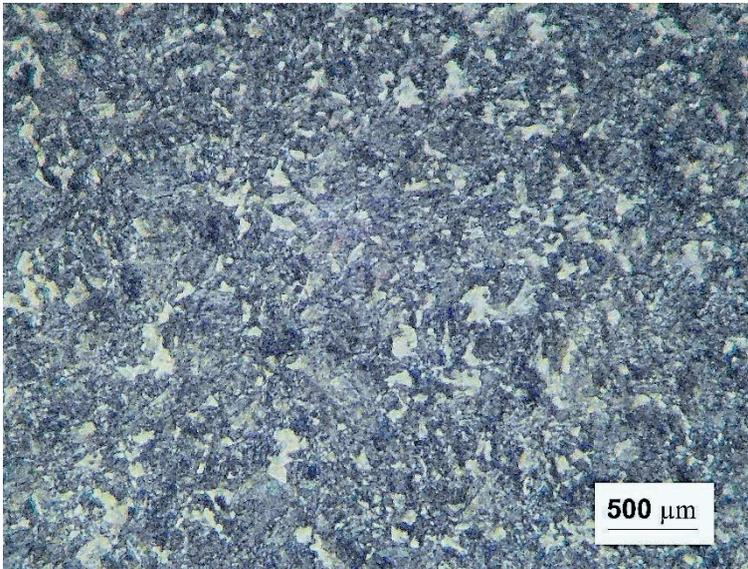


Figura 8: Metalografia da amostra na condição de têmpera e revenimento.

Portanto, o resultado de um tratamento térmico de têmpera e revenimento em aço SAE 1045 é uma combinação de alta dureza da martensita e maior tenacidade da microestrutura resultante do revenimento. Isso torna o aço SAE 1045 adequado para uma ampla gama de aplicações, como engrenagens, eixos e outras peças que requerem resistência mecânica. O controle adequado dos parâmetros de tratamento térmico é fundamental para obter as propriedades desejadas no aço SAE 1045, atendendo aos requisitos específicos de engenharia.

Na Figura 9 é apresentada a amostra que foi submetida ao processo de recozimento. A amostra recozida exibe uma concentração maior de grãos de ferrita, devido ao crescimento desses grãos, e ilhas perlíticas mais grosseiras, resultantes do resfriamento mais lento. Essas observações corroboram as condições sugeridas por Chiaverini (2005), uma vez que o tratamento de recozimento tem o propósito de reduzir as tensões e a dureza do material, indicando uma tendência ao aumento da ductilidade e tenacidade do aço.

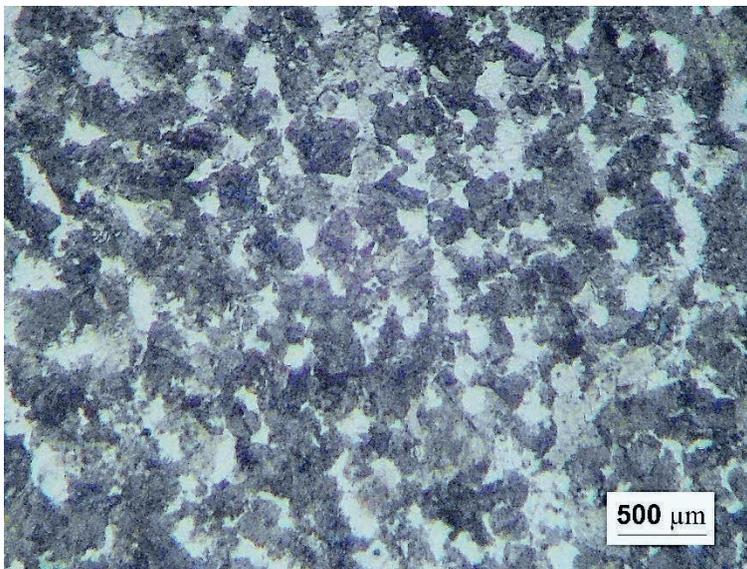


Figura 9: Metalografia da amostra na condição de recozida.

De acordo com Chiaverini (2005), o uso de água como meio de resfriamento é interpretado como um processo mais abrupto, em contraste com outras fontes de resfriamento, como o óleo, culminando em uma estrutura com dureza elevada e altamente frágil para a têmpera, formada por grande volume de martensita. O resultado da amostra submetida ao processo de têmpera é apresentado na Figura 10.

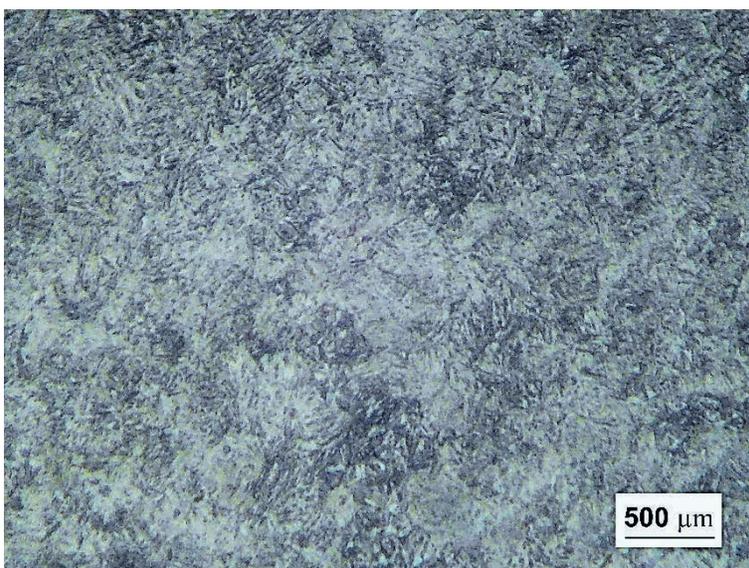


Figura 10: Metalografia da amostra na condição de têmpera.

A correlação entre os dados verificados nas imagens junto aos dados obtidos nas medições de dureza comprova as alterações nos aspectos de resistência mecânica frente as variações dos tratamentos térmicos. Conforme apresentado na Tabela 3, a amostra submetida a têmpera apresenta maior dureza média (59 HRC) enquanto a amostra submetida ao recozimento apresentou-se fora da escala tradicionalmente aplicada em Rockwell C, com -5 HRC, após reavaliação para a escala Rockwell B obteve-se 86 HRB. Estes extremos são obtidos devido a microestrutura resultante, para os quais a martensita apresenta elevada dureza enquanto a estrutura ferrítica-perlítica, obtida por maior tempo de resfriamento, permite um material final com maior ductilidade.

Condição	Dureza
Sem tratamento	23 HRC
Revenimento	33,5 HRC
Recozimento	86 HRB
Têmpera	59 HRC

Tabela 3: Durezas médias obtidas para cada condição

Quanto as amostras sem tratamento térmico e com tratamento de têmpera e revenimento, observam-se durezas médias de 23 e 33,5 HRC, respectivamente, indicando que o processo de fabricação (laminação), se comparada ao processo de recozimento, já apresenta maior dureza. Durante a laminação, o ciclo térmico da barra permitiu a formação de martensita e seu revenimento, possivelmente em alta temperatura como evidenciado pela microestrutura da Figura 7 e o valor de dureza encontrado. Além disso, os resultados encontrados para a amostra temperada e revenida corroboram com o resultado de fornecimento, pois os valores encontrados quanto a dureza e microestrutura são similares. A têmpera seguida pelo revenimento proporciona uma microestrutura refinada da martensita que alia dureza e tenacidade necessárias para diversas aplicações na indústria metalmeccânica.

CONCLUSÕES

Durante a realização deste trabalho foi possível determinar que parâmetros físicos, como a dureza, podem ser alterados devido ao emprego de tratamentos térmicos. As amostras de aço SAE 1045 submetidas aos tratamentos térmicos de têmpera, têmpera seguida por revenimento e recozimento, indicaram características tradicionalmente observadas na bibliografia, fortalecendo os resultados experimentais obtidos.

A amostra submetida a têmpera apresentou microestrutura martensítica, obtidos a partir do aquecimento acima da zona de austenitização e o rápido resfriamento, atingindo uma dureza média de 59 HRC. O resultado de têmpera seguido do revenimento

proporcionou o alívio de tensões internas e perda da supersaturação de carbono da martensita, com dureza média de 33,5 HRC. Para o recozimento, a escala de dureza obtida está em uma zona não usual da escala HRC, com um valor médio de -5 HRC, sendo necessário uma nova avaliação na escala Rockwell B, onde obteve-se valores de 86 HRB. Essa diminuição da dureza se deve a formação de perlita e ferrita. Por fim, indícios de aumento de resistência mecânica devido a ciclo térmico ocorrido durante a laminação do material foram observados na microestrutura, o que permitiu uma dureza média de 23 HRC, próxima daquela obtida na condição temperada e revenida deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- CALLISTER, William D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005.
- CHIAVERINI, Vicente. Tecnologia mecânica: materiais de construção mecânica. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- CHIAVERINI, Vicente. Tratamentos térmicos das ligas metálicas. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2008.
- COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.
- GGD Metais. Catálogo: Aços Construção mecânica. **SAE 1045**. Disponível em: < https://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-1045/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwqP2pBhDMARIsAJQ0Czq8uVNepAWdkM-cqqonz7n7WH7weI0-SRSxd_wuKbJWYrhzkv1y5mMaAtGVEALw_wcB>. Acesso em 30/10/2023.
- IBRAHIM, A.; SAYUTI, M. Effect of Heat Treatment on Hardness and Microstructures of AISI 1045, *Advanced material research* 119, 2015, 575–579.
- SILVA, Amanda de Oliveira. Influência de diversos tratamentos térmicos na microestrutura e dureza do aço 1045. 2021. 39f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Ceará, UFC, Fortaleza.
- SINGH, S.; SAMIR, S.; KUMAR, K. THAPA, S. Effect of heat treatment processes on the mechanical properties of AISI 1045 steel. *Materials Today: Proceedings*. 2021 5097-5101.
- VALE, Alan Rafael Menezes do. Tratamento térmico. Belém: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA), 2011.
- VAN VLACK, Lawrence H. Princípios de ciência dos materiais. São Paulo: Edgard Blucher, 2000.