



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

INFLUÊNCIA DA TÊMPERA E DA NORMALIZAÇÃO NA DUREZA E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO AÇO 8640

Deividy Soares de Araujo, deividy8dcef20@gmail.com¹
Lorisvan Dyego Pereira Rodrigues, lorisvan55@outlook.com¹
Lucas Carvalho de Andrade, carvalholucas539@gmail.com¹
Thiago Ferreira Gomes, thiago.gomes@udf.edu.br²

¹Centro Universitário do Distrito Federal, 704/904 Seps Eq 702/902, Brasília - DF, 70390-045

²Universidade de Brasília Campus Gama - St. Leste Projeção A - Gama Leste, Brasília - DF, 72444-240

Resumo. Este estudo investigou a influência dos processos de têmpera e normalização na propriedade mecânica do aço SAE 8640, com ênfase na resistência à tração e na dureza. Foram utilizados corpos de prova submetidos ao tratamento de têmpera a 1100°C, seguido de resfriamento em água conforme os parâmetros estabelecidos, enquanto outros corpos foram resfriados naturalmente, passando pelo processo de normalização. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013. Os resultados revelaram um aumento de aproximadamente 15% na resistência à tração após a têmpera, enquanto a normalização resultou em uma redução de cerca de 50% na resistência, porém com um aumento de quase três vezes na deformação. A dureza após a têmpera apresentou um aumento de 102% em relação ao material não tratado, ao passo que a normalização reduziu em 32% a dureza. Esses dados evidenciam como os tratamentos térmicos influenciam o comportamento mecânico do aço SAE 8640, especialmente em relação à resistência à tração e à dureza.

Palavras chave: Aço SAE 8640, Têmpera, Normalização, Ensaio de Tração, Dureza

Abstract This study investigated the influence of quenching and normalizing processes on the mechanical properties of SAE 8640 steel, with an emphasis on tensile strength and hardness. Test specimens were subjected to quenching treatment at 1100°C, followed by water cooling according to established parameters, while other specimens were naturally cooled, undergoing the normalizing process. The tests were conducted in accordance with ABNT NBR ISO 6892-1:2013. The results revealed an approximately 15% increase in tensile strength after quenching, while normalizing resulted in about a 50% reduction in strength but nearly tripled the deformation. The hardness after quenching showed a 102% increase compared to the untreated material, whereas normalizing reduced hardness by 32%. These data highlight how thermal treatments influence the mechanical behavior of SAE 8640 steel, particularly in terms of tensile strength and hardness.

Keywords: SAE 8640 Steel, Quenching, Normalizing, Tensile Testing, Hardness

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico e o crescimento das indústrias, a demanda por novos materiais tem se intensificado. Essa necessidade é impulsionada pela busca por resultados mais eficientes e adequados às diversas aplicações em diferentes áreas. A evolução das propriedades mecânicas e microestruturais dos materiais desempenha um papel crucial nesse cenário, proporcionando melhorias significativas para determinadas aplicações industriais (Anazawa *et al.*, 2014).

A melhoria nas propriedades dos materiais não apenas aumenta sua eficácia em diversas aplicações, também contribui para a redução de gastos nas empresas. Isso ocorre através da otimização do consumo de material, redução nos custos de fabricação e melhorias nos processos operacionais. Em um ambiente competitivo, esses fatores se tornam diferenciais para os principais setores industriais (Baptista, 2002). Assim, os tratamentos térmicos surgem como uma ferramenta essencial para alcançar esses objetivos, pois permitem ajustar as propriedades dos materiais de forma precisa, melhorando sua resistência, ductilidade, tenacidade e outras características importantes para aplicações industriais. Assim, os tratamentos térmicos desempenham um papel

fundamental na busca por materiais mais avançados e adequados às exigências do mercado (Silva, 2016).

Os tratamentos térmicos são métodos essenciais empregados para melhorar a estrutura interna dos materiais, visando uma nova formação estrutural. Esses processos são selecionados com base nas propriedades desejadas para a superfície e são aplicados para melhorar as microestruturas, bem como a morfologia. A utilização desses métodos resulta na formação de microconstituintes distintos, como ferrita, bainita, martensita e austenita, que são fundamentais para modificar as propriedades mecânicas finais dos materiais, de acordo com as necessidades do projeto (Do Vale, 2011). O controle preciso da temperatura durante o tratamento térmico é de extrema importância e determinante para alcançar as propriedades características desejadas.

A variação controlada da temperatura permite influenciar a transformação da estrutura do material, garantindo assim que as propriedades mecânicas finais atendam aos requisitos específicos do projeto. Portanto, o controle rigoroso da temperatura é um aspecto fundamental para o sucesso dos tratamentos térmicos e para garantir a qualidade e a consistência dos materiais produzidos (Abdalla *et al.*, 2016).

Para a pesquisa em questão, o material de análise selecionado é o aço SAE 8640, que é reconhecido por ser uma aço de baixa liga e médio teor de carbono. Essa classe de aço é notável por sua elevada resistência mecânica, excelente temperabilidade, usinabilidade e forjabilidade. Devido a essas características, o aço ABNT 8640 é amplamente utilizado nas indústrias de fabricação mecânica, muitas vezes substituindo outros aços. Conforme apresentado na Tabela 1, a composição química típica do aço SAE 8640 inclui:

Tabela 1 - Composição química do aço 8640 (Gerdau, 2021)

Composição química do aço 8640	
Elemento	Concentração [%]
Carbono, C	0,4
Cromo, Cr	0,5
Níquel, Ni	0,55
Molibdênio, Mo	0,2

Sua aplicação diversificada e sua capacidade de resistir a tensões mecânicas significativas fazem do aço SAE 8640 uma escolha positiva para uma variedade de setores industriais, incluindo automotivo, aeroespacial, construção naval, maquinário pesado e muito mais (Carvalho, 2004).

O presente artigo visa analisar as propriedades mecânicas do aço SAE 8640, visando o tratamento térmico de têmpera por meio de resfriamento em água. Este estudo é de extrema relevância devido às constantes evoluções nos tratamentos térmicos, que buscam aprimorar as propriedades estruturais, especialmente no que diz respeito ao aumento da dureza e da resistência do aço.

As recentes modificações nos métodos de tratamento térmico refletem a demanda por materiais cada vez mais robustos e adaptáveis aos rigores dos projetos industriais modernos. Nesse contexto, a análise das propriedades resultantes da têmpera do aço SAE 8640 é imprescindível ao direcionar os esforços para a obtenção de materiais de alta qualidade, capazes de atender aos exigentes critérios dos projetos industriais, este estudo contribui para o avanço contínuo da engenharia de materiais.

A compreensão aprofundada das propriedades mecânicas do aço SAE 8640 após o tratamento térmico de têmpera possibilita a otimização de processos de fabricação e a seleção mais criteriosa de materiais para aplicações específicas.

2. METODOLOGIA

Na etapa inicial da usinagem, realizou-se a confecção de quinze corpos de prova, sendo cinco submetidos à têmpera, cinco ao tratamento de normalização e cinco sem tratamento algum. O processo começou com o desbaste da barra no torno mecânico Hovam do Centro Universitário do Distrito Federal (UDF) até que a peça atingisse uma forma cilíndrica com um diâmetro de 10 mm. Uma vez alcançado o diâmetro de 10 mm, iniciou-se a retirada progressiva de material na parte útil do corpo de prova, reduzindo seu diâmetro para 4 mm com base na norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013, que define o procedimento para realização do ensaio de tração. De acordo com a norma, o comprimento útil do corpo de prova deve ser igual a pelo menos cinco vezes o diâmetro do mesmo. Com o desbaste concluído, prosseguiu-se com o processo de rosqueamento nas partes que serão acopladas à máquina de ensaio de tração. Para isso, o torno foi configurado de acordo com as medidas da rosca necessária, no caso, M10x1,5 como mostra na Fig. 1(A). A Figura 1(B) mostra como ficaram os corpos de prova confeccionados em um torno mecânico para realizar o ensaio de tração (Conrad, 2019).

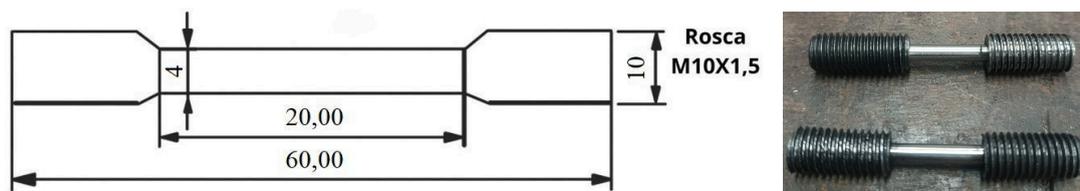


Figura 1 - Foto do corpo de prova: A) Representação esquemática (mm) B) Vista real (Autores, 2024)

Após realizar a usinagem submetemos os corpos de prova a um tratamento térmico com temperatura de 1100 °C no forno mufla do laboratório do UDF, seguido de um resfriamento rápido, obteve-se uma estrutura reforçada com melhores propriedades mecânicas (Lolla *et al.*, 2011). Para viabilizar essa proposta, optou-se por utilizar 15 corpos de prova composto pelo aço SAE 8640, que consiste em cinco com tratamento térmico, cinco com o tratamento de normalização e cinco sem tratamento térmico.

Para aumentar a dureza do material, recorreu-se ao tratamento térmico de têmpera, uma técnica que envolve aquecer o aço a uma temperatura acima da zona crítica. Durante este processo, o corpo de prova é mantido nessa temperatura por um período necessário para promover a transformação de sua microestrutura.

Após a austenitização, a peça é removida do forno e imediatamente mergulhada em água para evitar transformações térmicas indesejadas, como a formação de ferrita, cementita e perlita, que poderiam resultar em uma redução da dureza e na ineficácia do tratamento.

Durante o resfriamento do corpo de prova, os átomos de carbono ficam aprisionados no interior da austenita. Esse fenômeno leva a uma considerável deformação no reticulado cristalino da ferrita, o que resulta no aumento do campo tensional do material e, consequentemente, da dureza. Como resultado, formou-se um novo constituinte no aço, conhecido como martensita (Chiaverini, 2008).

A temperatura à qual os corpos de prova foram submetidos foi de 1100 °C e o tempo de encharque utilizado na têmpera foi de 25 minutos com o objetivo de garantir a completa austenitização do aço, durante esse intervalo de tempo, o tratamento térmico é conduzido. Após essa etapa, para finalizar o tratamento térmico no experimento, os corpos de prova são submetidos a um resfriamento brusco em água com agitação, visando consolidar as mudanças em suas estruturas cristalinas.

A normalização consiste em aquecer o aço a uma temperatura de 1100 °C, mantendo-o nesse estado por um tempo de 25 minutos e, em seguida, resfriando-o em temperatura ambiente de forma lenta. Durante o aquecimento, ocorre a eliminação de defeitos cristalinos, como discordâncias, e a redistribuição dos elementos de liga (Silveira, *et al.*, 2018).

Para realização dos ensaios, foi utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos, modelo WP300, da marca GUNT, com capacidade para 20 KN representado na Fig 2. A máquina é associada a um computador com o *software* da mesma marca e, através da leitura dos sensores da máquina e dos dados informados, gera um gráfico tensão-deformação e um arquivo de dados.



Figura 2. Fotos do ensaio mecânico: A) Máquina de tração; B) Vista frontal do corpo fixado; C) Ruptura do corpo (Autores, 2024)

Os procedimentos descritos estão em conformidade com a norma ABNT NBR ISO 6892-1:2015. Que diz que o ensaio de tração em um eixo é usado para encontrar valores como limite de escoamento, resistência à tração e deformação de ruptura. Também revela o limite de escoamento inferior, a deformação nesse limite e as deformações máximas sob carga. O ensaio é considerado destrutivo e envolve a aplicação de carga uniaxial de tração progressiva em um corpo de prova padronizado até sua ruptura completa. Após a fixação e o *reset* da máquina, o volante hidráulico foi girado de forma lenta e constante, a fim de garantir um maior número de pontos no gráfico e também maior suavidade das linhas.

Os dados obtidos durante o ensaio são fundamentais para caracterizar e especificar tecnicamente o material (Callister, 1991). Neste trabalho, o ensaio foi conduzido à temperatura ambiente e permitiu a determinação do limite de escoamento, o limite de ruptura, o alongamento e a deformação do material (Nogueira *et al.*, 2015).

De acordo com Matias Júnior (2018), a dureza de um material é definida como a sua resistência à indentação. Indentação é uma deformação causada por uma esfera ou ponto duro contra a superfície do material com uma força conhecida. Na escala de dureza Rockwell, é utilizada uma esfera de metal duro ou um penetrador de diamante como indentador. A depender do material, podem ser utilizadas várias combinações de penetrador e forças. Em resumo, a análise da dureza do aço SAE 8640 por meio da escala Rockwell C é uma etapa essencial no processo de avaliação e seleção de materiais para uma variedade de aplicações industriais e de engenharia. Ao garantir que o material atenda aos requisitos de dureza especificados, os engenheiros podem garantir o desempenho e a segurança dos produtos finais.

O ensaio de dureza foi conduzido com um durômetro Mitutoyo, modelo HR-110MR, optando-se pela utilização da escala de dureza Rockwell, especificamente a escala C (HRC), devido à natureza do aço duro em análise. Esta escolha foi motivada pela agilidade e praticidade na interpretação dos resultados, dispensando cálculos adicionais. Adicionalmente, a impressão gerada não tende a danificar nem a peça nem o corpo de prova durante a análise, garantindo a integridade do material em avaliação. Assim, a escala Rockwell C se destaca como uma opção eficiente e segura para avaliar a dureza do aço duro sem afetar sua estrutura. Para assegurar uma obtenção mais precisa dos resultados de dureza, foram realizadas medições em seis pontos distintos, sendo empregada uma média. Neste procedimento, utilizou-se uma ponta de diamante com ângulo de 120° e aplicou-se uma força de 150 kgf, conforme descrito por Askeland e Wright, (2023).

3. RESULTADOS

Após a realização dos ensaios de tração, foram gerados os gráficos de tensão-deformação das Fig. 3 e Fig. 4, para os corpos de prova temperados e normalizados, respectivamente, em relação aos corpos sem tratamento térmico. É nítida a diferença entre as curvas dos corpos de prova temperados e os corpos recozidos.

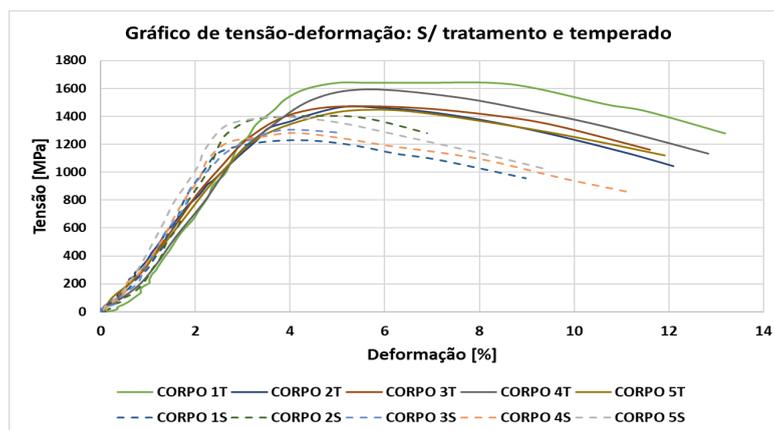


Figura 3 - Curva de tensão-deformação dos corpos de prova sem tratamento térmico e temperados (Autores, 2024)

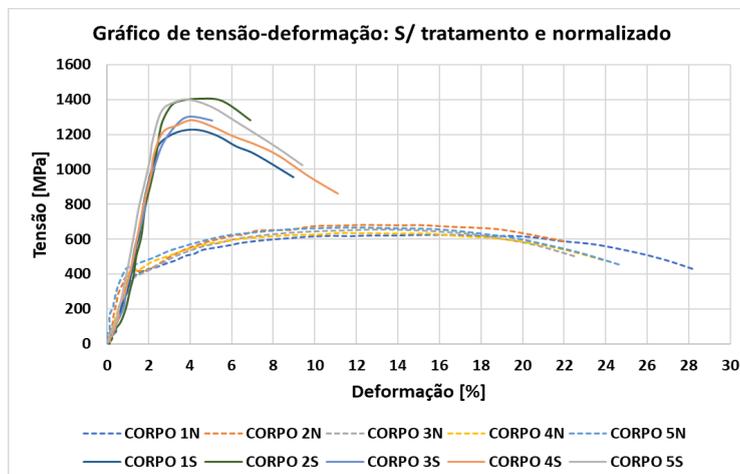


Figura 4 - Curva de tensão-deformação dos corpos de prova sem tratamento térmico e normalizados (Autores, 2024)

Ao observar as curvas dos corpos de prova temperados (Fig. 3), percebe-se valores de tensão mais elevados, porém com menor deformação e com o limite de escoamento muito próximo da tensão máxima, demonstrando uma característica frágil do material, proveniente do aumento de dureza causado pela têmpera.

A têmpera proporcionou um aumento médio de 15,32% de resistência máxima à tração e uma redução de 4,03% da deformação máxima em relação ao material que não foi submetido ao tratamento térmico.

Quando se analisa o gráfico de tensão-deformação dos corpos de prova normalizados (Fig. 4), percebe-se uma grande diferença entre as curvas dos corpos de prova normalizados e sem tratamento. A normalização torna o material muito mais dúctil, no entanto, este acaba perdendo resistência mecânica, resultando em apenas 49% da resistência máxima do corpo de prova sem tratamento térmico e aumento médio de 16,06% de deformação média.

Ao analisar as curvas de tensão-deformação dos materiais submetidos aos tratamentos de têmpera e normalização, observa-se que a têmpera aumenta a resistência e reduz a deformação máxima, enquanto a normalização faz o oposto. Durante a têmpera, ocorre um aumento da tensão interna e a geração de numerosas discordâncias entre os átomos, aumentando a resistência ao deslizamento atômico. Isso resulta em maior resistência mecânica, maior dureza e menor ductilidade. Por sua vez, na normalização, o resfriamento lento minimiza essas tensões internas. Como resultado, ao aplicar uma força, o material normalizado começa a se deformar sob menor tensão comparado ao material temperado, mas exibe muito mais ductilidade.

A deformação máxima, tensão de escoamento e tensão máxima são propriedades mecânicas importantes que desempenham um papel fundamental na caracterização do comportamento mecânico do aço SAE 8640 em diferentes condições, incluindo temperado e normalizado.

A deformação máxima, também conhecida como limite de deformação, é a quantidade máxima de deformação que um material pode suportar antes de falhar. Geralmente é expressa como uma porcentagem de alongamento ou de redução de área em relação às dimensões originais da amostra. Para o aço SAE 8640, a deformação máxima pode variar dependendo do estado de tratamento térmico, sendo geralmente maior no estado normalizado em comparação às outras amostras.

A tensão de escoamento é a quantidade de tensão que um material pode suportar antes de sofrer uma deformação plástica, ou seja, antes de começar a fluir de forma permanente. No caso do aço SAE 8640, a tensão de escoamento é uma medida importante da resistência do material à deformação plástica e pode ser significativamente maior no estado temperado, devido à formação da estrutura endurecida de martensita durante o processo de têmpera.

A tensão máxima, também conhecida como resistência à tração, é a máxima tensão que um material pode suportar antes de falhar por ruptura. Essa propriedade é fundamental para determinar a capacidade de carga e a resistência do material a forças externas. No aço SAE 8640, a tensão máxima pode variar dependendo do estado de tratamento térmico. No estado temperado, a tensão máxima é mais elevada. Isso se deve à formação da martensita, uma fase endurecida e altamente resistente que é obtida neste tratamento.

A martensita é conhecida por aumentar significativamente a resistência e a dureza do material, tornando-o capaz de suportar cargas mais altas antes de ocorrer a ruptura.

Assim, o estado temperado do aço 8640 oferece uma maior resistência mecânica em comparação aos outros estados, proporcionando uma opção mais adequada para aplicações onde são exigidas altas cargas ou resistência à deformação.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de tração (Autores, 2024)

Sem tratamento					
Amostra	Deformação Máxima [%]	Tensão de Escoamento [MPa]	Tensão Máxima [MPa]	Tensão Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Corpo 1S	8,98	1127,32	1224,64	955,10	46,14
Corpo 2S	6,90	1281,89	1404,98	1281,89	47,70
Corpo 3S	5,07	1148,31	1302,40	1280,46	42,73
Corpo 4S	11,11	1214,15	1282,37	861,11	45,18
Corpo 5S	9,40	1331,03	1398,30	1023,32	50,68
Média	8,29	1220,54	1322,54	1080,38	46,49

Temperado					
Amostra	Deformação Máxima [%]	Tensão de Escoamento [MPa]	Tensão Máxima [MPa]	Tensão Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Corpo 1T	13,19	1595,33	1639,69	1277,12	31,87
Corpo 2T	13,19	1315,29	1470,33	1044,31	37,13
Corpo 3T	11,60	1373,49	1471,29	1159,76	36,87
Corpo 4T	12,82	1519,00	1594,85	1133,52	34,07
Corpo 5T	11,91	1248,97	1448,39	1121,12	37,18
Média	12,32	1410,41	1524,91	1147,17	35,42
Normalizado					
Amostra	Deformação Máxima [%]	Tensão de Escoamento [MPa]	Tensão Máxima [MPa]	Tensão Ruptura (Mpa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Corpo 1R	28,33	418,39	623,53	424,12	35,73
Corpo 2R	22,04	417,44	683,17	589,18	32,61
Corpo 3R	22,66	378,32	656,45	497,59	29,56
Corpo 4R	24,00	422,21	634,98	475,16	36,40
Corpo 5R	24,73	419,82	665,99	451,31	49,10
Média	24,35	411,24	652,82	487,47	36,68

A tensão de escoamento é o ponto em que o material começa a apresentar deformação plástica, ou seja, quando deixa de se comportar elasticamente e começa a deformar permanentemente sob carga. No contexto dos resultados fornecidos para os corpos de prova normalizados e temperados do aço 8640, a tensão de escoamento média foi de 411,24 MPa para as amostras normalizadas, 1410,41 MPa para as temperadas e 1220,54 MPa para as que não sofreram tratamento. Portanto, a têmpera aumentou a tensão de escoamento em 15,56% em relação ao material não tratado e a normalização a reduziu em 66,3%.

Com a informação da tensão de escoamento e a deformação específica no momento do escoamento, é possível calcular o módulo de elasticidade do material. O módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young, é a medida da inclinação da reta do gráfico durante o regime elástico e é obtido através da tensão de escoamento dividida pela deformação específica. O valor do módulo de elasticidade de cada corpo de prova ensaiado consta na Tab. 1, bem como a média de cada tratamento. Nota-se que os valores são próximos entre si, apesar de a tensão de escoamento das amostras sem tratamento ser maior. A similaridade entre os valores, especialmente quando se analisam as médias, deve-se à semelhança do comportamento das amostras durante o regime de deformação elástica. Portanto, durante o regime elástico, apesar da diferença entre os valores de tensão de escoamento, houve a mesma proporção entre tensão e deformação independentemente do tratamento ao qual o material foi submetido.

A ruptura ocorre após a máxima deformação do material e, devido à estrição do corpo de prova, a tensão de ruptura costuma ser menor do que a tensão máxima. O processo de têmpera elevou a tensão de ruptura em aproximadamente 2,3 vezes em relação à normalização e em 6% em relação ao material sem tratamento. A tabela também indica que, sem tratamento, a média da tensão de ruptura é de 1080,38 MPa, após a normalização, de 487,47 MPa, enquanto que, após a têmpera, essa média aumenta para 1147,17 MPa.

Também foram fabricados corpos de prova para a realização do ensaio de dureza e foram submetidos a tratamentos térmicos nos mesmos parâmetros dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração. Para garantir maior precisão dos resultados, foram realizadas seis medições em cada amostra, e a média dos valores foi calculada. As seis medições no material com diferentes tratamentos térmicos estão no gráfico da Fig. 5. As médias para os corpos de prova temperados, sem tratamento e normalizados foram, respectivamente, 52,3 HRC, 25,8 HRC, 17,6 HRC, com desvios padrão de 0,67 HRC, 1,11 HRC e 0,28 HRC. A têmpera aumentou a dureza, em média, 102,71%, enquanto a normalização a reduziu em 31,78%.

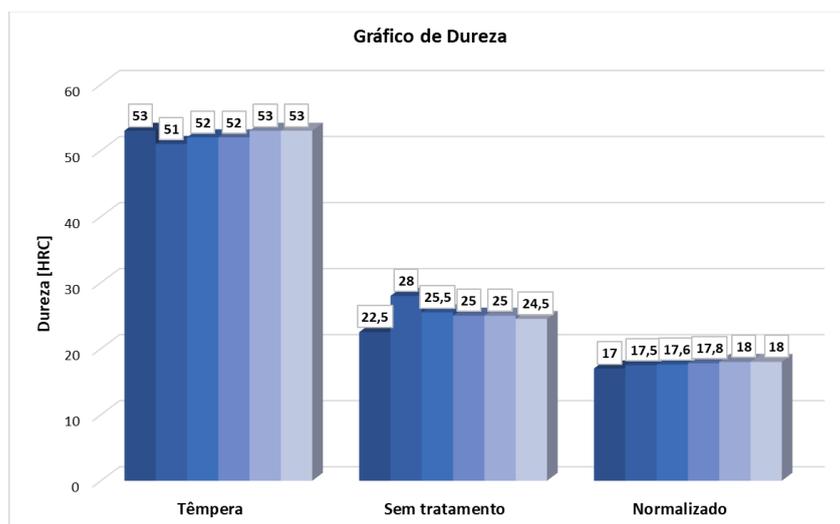


Figura 5 - Resultado do ensaio de dureza (Autores, 2024)

4. CONCLUSÃO

O estudo do comportamento mecânico do aço SAE 8640 destaca a importância fundamental de compreender suas propriedades mecânicas para o desenvolvimento de produtos cada vez melhores, capazes de atender às demandas crescentemente rigorosas dos usuários. O presente artigo mostra que os ensaios de tração e dureza são cruciais para avaliar as propriedades mecânicas do material, fornecendo informações sobre sua resistência, seu comportamento em relação à deformação e sua capacidade de suportar cargas.

O ensaio de tração é fundamental na engenharia de materiais para determinar propriedades mecânicas. Uma amostra é gradualmente submetida a carga até a ruptura, registrando-se carga em relação à deformação. Propriedades como limite de escoamento, resistência à tração e deformação são extraídas da curva resultante. O limite de escoamento marca o início da deformação permanente, o limite de resistência à tração é o ponto máximo de tensão antes da ruptura, e o módulo de elasticidade mede a rigidez do material.

Os resultados revelaram que a tensão máxima média foi de 652,82 MPa para os corpos de prova normalizados, de 1524,91 MPa para os corpos de prova submetidos à têmpera e de 1322,54 para os que não sofreram tratamento. A deformação máxima média dos corpos normalizados, temperados em sem tratamento foi, respectivamente, 24,35%, 12,32% e 8,29%. Ao analisar estes resultados nota-se que a normalização proporciona um notável aumento da deformação máxima sofrida, contudo, resulta numa drástica redução da tensão máxima, cerca de metade da resistência da média das amostras sem tratamento, resultado do deslizamento da estrutura atômica do material após o alívio das tensões internas obtida no resfriamento lento. Em contraste, devido ao resfriamento brusco do material na têmpera, aumentam-se as tensões internas do material e criam-se discordâncias em sua estrutura interna, dificultando o deslizamento da mesma, por isso é possível perceber que o corpo de prova temperado tem comportamento mais frágil, tendo pouca deformação plástica e com a tensão máxima próxima ao limite de escoamento. Obteve-se melhora na resistência à tração, cerca de 15,32% a mais que o material não tratado, mas redução de 4,03% na deformação máxima média.

Ao comparar a diferença de dureza na escala Rockwell C entre o aço temperado com 52,3 HRC e o aço temperado com 48,4 HRC do artigo de referência (Silveira, F. da *et al.*, 2018) é de 4,6 HRC, a porcentagem de diferença na dureza é de aproximadamente 8,68%, portanto, os resultados obtidos estão próximos aos da literatura. A dureza medida na amostra sem tratamento foi de 25,8 HRC e na normalizada de 17,6 HRC, portanto, a têmpera elevou a dureza em 102,71% e a normalização a reduziu em 31,78%. O aumento na dureza obtido na têmpera e a redução obtida na normalização são resultado da forma como o material foi resfriado. Conforme mencionado no parágrafo anterior, o resfriamento repentino resulta no aumento de discordâncias que exige mais força para que o material sofra deformação, conseqüentemente aumenta a dureza e reduz a ductilidade do material. Na normalização, o resfriamento lento permite que haja minimização das discordâncias, diminuindo a dureza e aumentando a ductilidade, porém permite que o material sofra cisalhamento em sua estrutura cristalina e perca resistência mecânica.

Essas análises destacam claramente o impacto significativo do tratamento térmico nas propriedades do aço 8640. Essa diferença marcante na dureza entre os dois tratamentos aplicados ao material reflete as mudanças estruturais induzidas pelos diferentes processos térmicos. Enquanto a têmpera resulta em uma estrutura mais dura e resistente, o recozimento busca tornar o material mais maleável.

Assim, conclui-se que o estudo do comportamento mecânico do aço SAE 8640 fornece informações valiosas sobre as propriedades dos materiais, mas também contribui para produções na engenharia de materiais e na composição de peças envolvidas nas indústrias entre outros mais.

5. REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6892-1: Materiais Metálicos: Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à Temperatura Ambiente. Rio de Janeiro. 2013.
- ANAZAWA, Roberto Masato et al. Estudo comparativo das propriedades mecânicas em aços 4340 e 300M submetidos a tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, v. 31, n. 1-2, p. 32-37, 2014.
- ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. *Ciência e engenharia dos materiais*. Cengage Learning, 2023.
- BAPTISTA, André Luís de Brito. Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 55, p. 103-109, 2002.
- CARVALHO, Antonio Rogério T. Estudo da influência da agitação e da Severidade de Têmpera do meio de resfriamento na determinação de velocidades críticas de têmpera. 2004. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia mecânica. Universidade Estadual de Campinas. São Luis-MA.
- CHIAVERINI, V. (2008). *Aços e Ferros Fundidos: Características Gerais, Tratamentos Térmicos, Principais Tipos*. Editora: ABM, São Paulo, SP, ed. 7, ampl. e rev
- CALLISTER JR., William D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos S.A., 2000. 589 p.
- CONRAD, Evandro Andrei et al. Comparação de resistência mecânica entre barra chata e chapa por meio de ensaio de tração. In: 8ª MOEPEX. 2019.
- DO VALE, Alan Rafael Menezes. Tratamento térmico. Belém: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA), 2011.
- GERDAU. Tipos de aço e sua classificação: Normas SAE, AISI e ABNT. 2021. Disponível em: <https://stg-br.gerdau.com/2021/11/11/11/tipos-de-aco-e-sua-classificacao-normas-sae-aisi-abnt/>. Acesso em: 19 maio 2024.
- NOGUEIRA, Rosiane Castro et al. Análise microestrutural de um aço AISI 4350 submetido a tratamentos térmicos para a formação de bainita. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, v. 34, n. 1, p. 44-48, 2015.
- LOLLA, T. et al. Development of rapid heating and cooling (flash processing) process to produce advanced high strength steel microstructures. *Materials Science and Technology*, v. 27, n. 5, p. 863-875, 2011.
- MATIAS JUNIOR, Edilson. Comportamento mecânico do aço AISI H13 temperado. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Silva, L. H., & Cione, R. C. (2016). Influência da temperatura de têmpera e revenido nas propriedades mecânicas do aço AISI 8640. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 20(1), 514-522.
- SILVEIRA, F. da et al. Tratamento Térmico de Têmpera em Aço ABNT 8640: análise das Propriedades Mecânicas. *HOLOS*, v. 34, n. 2, p. 49-59, 2018.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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