

ASPECTOS FUNDAMENTAIS DO ENSAIO DE TRAÇÃO PARA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MATERIAIS

Jessé Valente de Liz^{1,2}, Ariane Comochina Bauer¹, Breno Salgado Barra³, Rafael Machado Casali³, Alexandre Mikowski³

*¹Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM),
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Joinville, Brasil
(jesse.v@posgrad.ufsc.br)*

*²Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de
Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil*

*³Departamento de Engenharias da Mobilidade, Universidade Federal de Santa Catarina
(UFSC), Joinville, Brasil*

Resumo: O ensaio de tração é amplamente utilizado para a caracterização mecânica de materiais, permitindo determinar propriedades mecânicas como módulo de elasticidade, limite de escoamento, resistência à tração, ductilidade e tenacidade. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica dos fundamentos do ensaio, abordando a interpretação das curvas tensão-deformação, as definições matemáticas das principais propriedades mecânicas e o comportamento mecânico de diferentes classes de materiais.

Palavras-chave: ensaio de tração; propriedades mecânicas; curva tensão-deformação; caracterização de materiais; comportamento mecânico.

INTRODUÇÃO

Para garantir o funcionamento adequado de projetos de estruturas, componentes e máquinas, é fundamental entender o comportamento mecânico dos materiais quando submetidos a solicitações, ou seja, às cargas impostas (Gere e Goodno, 2010; Liz et al., 2025). Para isso, frequentemente são realizados testes em laboratório com corpos de prova padronizados, que permitem avaliar as deformações elásticas e plásticas no material durante e após o ensaio mecânico, utilizando equipamentos específicos para essa finalidade (Gere e Goodno, 2010).

O ensaio de tração é uma das maneiras de identificar experimentalmente as propriedades mecânicas de um determinado material. Esse ensaio mecânico é caracterizado como destrutivo, pois provoca a deformação plástica e, possivelmente, a ruptura do material devido à aplicação de uma força uniaxial em um corpo de prova (Souza, 1982). Segundo Souza (1982), os dados experimentais obtidos com o referido ensaio podem ser utilizados para comparação entre diferentes materiais, aperfeiçoamento de materiais e controle de produção.

Amplamente empregado na indústria e nas engenharias de materiais e mecânica para o controle das especificações de recebimento de matéria-prima, o ensaio mecânico de tração é extremamente relevante para garantir o atendimento aos requisitos necessários à sua aplicação. Sua simplicidade e rapidez de execução possibilitam a obtenção de informações

cruciais sobre o comportamento dos materiais, o que é fundamental para o projeto e a fabricação de peças e componentes (Garcia et al., 2008).

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo apresentar os fundamentos teóricos do ensaio de tração, abordando os principais conceitos, propriedades mecânicas e discutir interpretações da curva tensão-deformação para diferentes classes de materiais.

MÉTODO

O presente estudo consiste em uma pesquisa bibliográfica, desenvolvida a partir do levantamento e da análise de literatura técnico-científica sobre o ensaio de tração e a caracterização mecânica de materiais.

Conforme as pesquisadoras Marconi e Lakatos (2013, p. 57), o escopo de uma pesquisa bibliográfica é “[...] colocar o pesquisador em contato direto com tudo o que foi escrito, dito ou filmado sobre determinado assunto, inclusive conferências”.

O termo genérico “revisão de literatura” abrange todas as publicações que oferecem uma visão de assuntos específicos por meio da literatura, tratando de diferentes abordagens para seu desenvolvimento (Galvão e Ricarte, 2019).

Dentro desse contexto, a fundamentação teórica foi elaborada com base em livros clássicos e obras de referência em Ciência e Engenharia de Materiais, complementadas por artigos científicos e dissertações

pertinentes ao tema. A seleção das fontes priorizou publicações de reconhecida relevância acadêmica, amplamente empregadas no ensino e na pesquisa, visando reunir e apresentar os principais conceitos relacionados às propriedades mecânicas dos materiais, à interpretação das curvas tensão-deformação e às definições matemáticas utilizadas na caracterização mecânica.

A CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO

Callister (2008) explicou que, de acordo com o nível de exposição às tensões mecânicas sofridas por um corpo de prova, o resultado de sua deformação varia entre as deformações elásticas e elastoplásticas. A deformação pode ocorrer de forma elástica, caracterizada pela relação linear entre tensão e deformação, quando o corpo de prova ou elemento não sofre deformação permanente e retorna ao seu estado inicial após a liberação da carga aplicada. Por outro lado, na deformação elastoplástica, o material não consegue recuperar completamente seu estado original, pois sofreu uma deformação permanente em sua estrutura interna.

Para Garcia et al. (2008), os ensaios mecânicos permitem obter informações significativas sobre as propriedades do material, com base em seu comportamento mecânico após a aplicação de esforços externos. Esses ensaios fornecem dados quantitativos sobre as características mecânicas, destacando as principais: limite de resistência à tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, módulo de tenacidade, ductilidade, coeficiente de encruamento e coeficiente de resistência.

Ademais, Zhu e Joyce (2012) afirmaram que é possível avaliar o comportamento mecânico dos materiais por meio de características como o comportamento de fratura, a resistência do material, a deformação, entre outros aspectos.

Para a realização do ensaio mecânico, um corpo de prova, fabricado de acordo com normas técnicas, é submetido a uma carga uniaxial progressiva até atingir a sua ruptura. Os resultados geram uma curva tensão-deformação, permitindo a análise do comportamento dos materiais em diferentes condições (Gama, 2017). A Figura 1 ilustra um corpo de prova submetido à carga uniaxial.

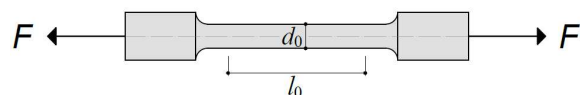


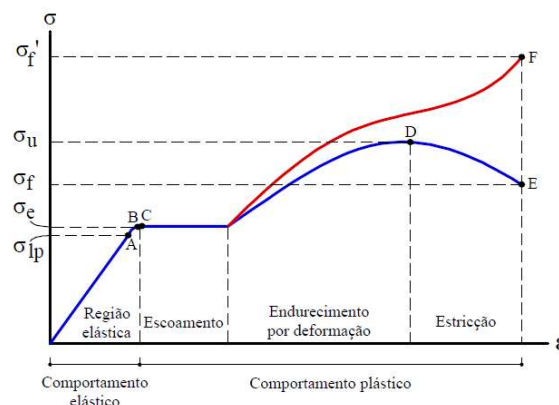
Figura 1. Representação esquemática de um corpo de prova para ensaio de tração. Adaptado de Shigley (1972) *apud* Gama (2017, p. 38).

Com relação ao corpo de prova, o diâmetro original d_0 e o comprimento de referência l_0 são registrados antes

do início do ensaio mecânico, para que, em seguida, sejam aplicadas as forças uniaxiais F nas extremidades do corpo de prova, sendo sua magnitude monitorada pela célula de carga, o que promove o alongamento do material.

Neste cenário, a Figura 2 apresenta representações esquemáticas das curvas tensão (eixo da ordenada) versus deformação (eixo da abscissa).

a) Material dúctil (aço)



Legenda:

- A: limite proporcional;
- B: limite de elasticidade;
- C: tensão de escoamento;
- D: limite de resistência;
- E: tensão de ruptura de engenharia; ϵ
- F: tensão de ruptura real.

b) Material frágil

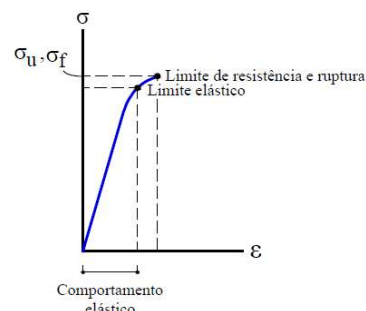
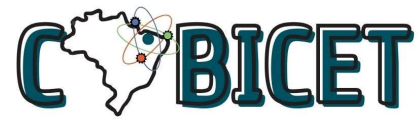


Figura 2. Representação gráfica de curvas tensão-deformação para materiais dúcteis (a) e frágeis (b). Adaptado de Hibbeler (2010, p. 58) e Shigley (1972) *apud* Gama (2017, p. 39).

Dentro dessa abordagem, duas curvas típicas tensão *versus* deformação, que indicam os pontos para a determinação das propriedades mecânicas, representam os comportamentos mecânicos de materiais dúcteis (Figura 2(a)) e frágeis (Figura 2(b)) e possibilitam suas análises e detalhamento.

O comportamento mecânico de um material submetido ao ensaio de tração inicia-se em um regime elástico-linear, no qual o módulo de elasticidade (representado pela inclinação da reta) pode ser obtido. O ponto A é chamado de limite de proporcionalidade, onde a curva começa a apresentar deformação de



forma não permanente, desde que a carga seja removida até esse ponto. O limite de elasticidade é marcado pelo ponto B. Se o corpo de prova for carregado além deste ponto, ocorrerá a deformação plástica do material, resultando em uma deformação permanente. A integração numérica da curva tensão-deformação (Figura 2) até o ponto A (área de um triângulo) ou até o ponto B (aproximadamente a área de um triângulo) fornece a resiliência elástica, ou seja, a energia elástica armazenada mecanicamente pela solicitação da tração uniaxial ao corpo de prova (Figura 1) (Garcia et al., 2008; Hibbeler, 2010).

Na sequência, com o acréscimo da tração uniaxial, ao atingir o ponto C, a partir deste momento ocorre o início da deformação plástica, pois a tensão imposta a corpo de prova ultrapassou o limite de escoamento ($LE = \sigma_e$), ou seja, a tensão de escoamento. Para uma deformação de x% (geralmente 0,2% para metais e 1% para polímeros), uma reta tracejada (o leitor precisa imaginar) e paralela ao regime elástico-linear intercepta a curva. Nesse ponto, define-se o limite de escoamento (LE) e o material entra no regime plástico do comportamento mecânico.

O ponto D é o limite de resistência à tração ($LR = \sigma_u$) e, fisicamente, representa a tensão máxima. Para materiais dúcteis, Figura 2(a), após uma considerável deformação plástica, o corpo de prova submetido a carregamento uniaxial atinge o ponto E, ou seja, a tensão de ruptura (ou fratura), resultando na ruptura do mesmo. Para materiais frágeis, Figura 2(b), o ponto D coincide com o ponto E, momento em que o material atinge a tensão de ruptura e, conseqüentemente, a ruptura do corpo de prova (Gama, 2017). Fisicamente, o limite de resistência à tração (LR) quando atingido, a deformação plástica torna-se não uniforme até a ruptura do corpo de prova, momento em que ocorre a deformação final, definindo o alongamento (AL) (Callister, 2008; Garcia et al., 2008).

As curvas (Figura 2) podem apresentar diferentes variações de acordo com o tipo de material ou ainda na repetição do ensaio de tração para o mesmo material, que, por sua vez, pode apresentar resultados diferentes dependendo das características de temperatura do corpo de prova ou da velocidade de aumento da carga. No entanto, é possível determinar duas categorias importantes, segundo a identificação de características comuns entre os materiais, que podem ser classificados como materiais dúcteis ou frágeis (Beer, 1982).

DEFINIÇÕES MATEMÁTICAS PARA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Com a realização do ensaio de tração, obtém-se a curva tensão-deformação de engenharia ou convencional (σ_c), construída a partir da força uniaxial aplicada ao corpo de prova pela máquina de ensaio e

medida pela célula de carga, sendo definida por (Callister, 2008; Garcia et al., 2008):

$$\sigma_c = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

onde F corresponde à força de tração uniaxial aplicada, e A_0 é a área de seção transversal na região do comprimento útil do corpo de prova, normalmente circular ou retangular.

Na região do escoamento (ponto C, Figura 2(a)), a máxima tensão atingida nessa área trata-se do limite de escoamento (LE), obtido pela razão entre a força obtida no escoamento (F_e) com a área inicial (A_0), sendo determinado por (Garcia et al., 2008):

$$LE = \sigma_e = \frac{F_e}{A_0} \quad (2)$$

Ao calcular a carga de força máxima suportada no ensaio de tração, obtém-se o ponto de limite de resistência à tração (ou tensão máxima, σ_u), que corresponde à razão entre a força máxima e a área inicial (A_0), conforme a equação (Garcia et al., 2008):

$$LR = \sigma_u = \frac{F_u}{A_0} \quad (3)$$

Os autores apresentam que a razão entre o alongamento (Δl) e o comprimento útil inicial do corpo de prova antes do ensaio (l_0) define, matematicamente, a deformação de engenharia ou convencional (ε_c), grandeza adimensional definida por (Garcia et al., 2008):

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (4)$$

em que l_f refere-se ao comprimento útil final após a ruptura.

A fim de caracterizar a ductilidade dos materiais, os autores Garcia et al. (2008) destacaram o cálculo do módulo de tenacidade ($MT = U_t$, ou tenacidade), que se refere à capacidade de absorção do corpo de prova até a sua ruptura. As expressões matemáticas para determinar o módulo de tenacidade para materiais dúcteis e frágeis, respectivamente, são dadas por:

$$MT = U_t = \left(\frac{LE + LR}{2} \right) \cdot AL \quad (5)$$

$$MT = U_t = \left(\frac{2}{3} \right) LR \cdot AL \quad (6)$$

onde MT é a energia total dissipada até a ruptura do corpo de prova, obtida matematicamente a partir dos valores de LE , LR e AL .

TENSÃO-DEFORMAÇÃO REAL

Para uma definição mais precisa das características de tensão e deformação, pode-se ir além das informações dimensionais originais do corpo de prova, avaliando

as alterações durante toda a realização do ensaio, especialmente após o corpo de prova atingir a zona plástica. Esse método é denominado ensaio de tração real, enquanto o ensaio convencional é corrigido (Souza, 1982; Hibbeler, 2010).

A tensão real (σ_r), é definida pela (Equação (7)), relação entre a força (F , em N) e a área de seção transversal instantânea (A , em m²), a qual varia a cada instante do teste, caracterizando melhor a região plástica (Garcia et al., 2008).

$$\sigma_r = \frac{F}{A} \quad (7)$$

Os mesmos autores complementaram que a deformação real (ε_r) é definida pela (Equação (8)), que se baseia na variação efetiva do comprimento em relação ao comprimento original, ou como a função da variação infinitesimal da deformação, determinada por:

$$d\varepsilon_r = \frac{dl}{l} \quad (8)$$

aplicada a uma deformação uniaxial uniforme.

Ao traçar a curva tensão-deformação, costuma-se utilizar o termo deformação real (ou verdadeira) ou deformação logarítmica (Equação (9)), que corresponde à soma (integral definida) dos alongamentos incrementais, dividida pelo comprimento de referência atual sob a força (F), onde:

$$\varepsilon_r = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (9)$$

Uma importante característica da tensão verdadeira é que ela aumenta continuamente até a fratura (Shigley, 1972). A Figura 2(a) (curva vermelha) ilustra a comparação entre as curvas tensão-deformação real e de engenharia (Hibbeler, 2010; Faridmehr et al., 2014), mostrando que as tensões e deformações verdadeiras se tornam mais evidentes à medida que a deformação aumenta. Vale destacar que a tensão real pode ser consideravelmente maior que a tensão de engenharia, e, conseqüentemente, a seção transversal da amostra diminui, impactando sua resistência mecânica.

Até o limite de proporcionalidade entre tensão (σ_{lp}) e deformação (ε_c), na região elástica linear das curvas tensão-deformação real e de engenharia, a Lei de Hooke é válida, sendo expressa por (Callister, 2008; Garcia et al., 2008):

$$\sigma_{lp} = E\varepsilon_c \quad (10)$$

em que E é o módulo de elasticidade, o qual fisicamente representa a rigidez elástica do material.

Logo após a tensão de escoamento (Equação (2)), no ponto C da Figura 2, até a tensão máxima (Equação

(3)), no ponto D da Figura 2, a relação entre a tensão e deformação apresenta um comportamento mecânico não linear e é matematicamente representada por (Souza, 1982; Garcia et al., 2008):

$$\sigma_r = \sigma_e + K\varepsilon_r^n \quad (11)$$

em que a tensão real e a deformação real são, respectivamente, definidas por:

$$\sigma_r = \sigma_c(1 + \varepsilon_c) \quad (12)$$

$$\varepsilon_r = \ln(1 + \varepsilon_c) \quad (13)$$

Com relação à Equação (11), por meio de manipulação matemática que envolve logaritmos decimais ou naturais, é possível determinar o coeficiente de resistência K e o expoente de encruamento do material, n .

CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO PARA DIFERENTES MATERIAIS

A representação gráfica da Figura 3 ilustra as curvas de tensão-deformação para quatro tipos de materiais, incluindo: Figura 3(a) metais; Figura 3(b) cerâmicas, vidros ou concreto, sob pequenas taxas de deformação; Figura 3(c) compósitos; Figura 3(d) elastômeros; e Figura 3(e) poliméricos (termoplásticos). As representações são qualitativas e variam para cada material, significando que as tensões e deformações reais podem diferir na prática (Askeland et al., 2006).

Para os termoplásticos (Figura 3(e)), considera-se que a temperatura esteja acima da transição vítrea (T_g), enquanto para os metais (Figura 3(a)), a temperatura ambiente serve como referência. Metais e termoplásticos exibem uma fase elástica inicial, seguida por uma fase plástica não linear. Os elastômeros (Figura 3(d)), como borracha e silicões, são caracterizados por seu comportamento distinto, com grande parte de sua deformação sendo elástica e não linear. Em contraste, cerâmicas, vidros e concretos (Figura 3(b)) apresentam uma fase elástica linear e praticamente nenhuma deformação plástica à temperatura ambiente (Askeland et al., 2006).

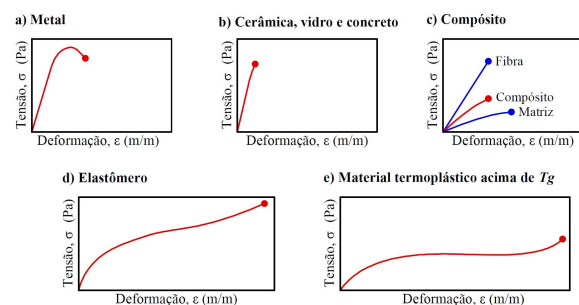
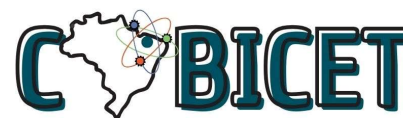


Figura 3. Curvas típicas de tensão-deformação para diferentes materiais. Adaptado de Askeland et al. (2006, p. 205) e Beer (1982) *apud* Gama (2017, p. 40).



Os materiais poliméricos apresentam um comportamento mecânico entre elástico e viscoso, sendo o ensaio de tração uma ferramenta importante para compreender seu comportamento viscoelástico, ou seja, a relação entre deformação, tempo e temperatura utilizados no experimento. O ensaio pode ser realizado em corpos de prova padronizados, que são submetidos a uma força de tração uniaxial crescente até a fratura, ou em produtos acabados, como filmes, fibras e cordas (Cassu e Felisberti, 2005).

A estrutura de cada material polimérico desempenha um papel importante e está diretamente ligada à sua densidade e propriedades mecânicas. Polietilenos de baixa densidade, compostos por ramificações longas, podem resultar, por exemplo, em aumento da resistência ao impacto, redução da densidade e maior facilidade de processamento. Já os polietilenos de baixa densidade com ramificações curtas são mais cristalinos e resistentes à tração (Coutinho et al., 2003).

Para materiais cerâmicos, o ensaio é considerado importante para avaliar sua fragilidade, ou seja, sua baixa capacidade de deformação antes da ruptura. Ele pode ser realizado em corpos de prova padronizados ou em produtos acabados, como tijolos, telhas e louças. O ensaio é mais difícil de ser realizado devido à fragilidade do material; por esse motivo, geralmente esse tipo de material é caracterizado por meio de ensaios de flexão (Callister, 2008; Garcia et al., 2008).

Os materiais do tipo compósitos são amplamente utilizados nos diversos segmentos industriais devido à sua versatilidade. As propriedades e custos dos materiais compósitos podem ser modificados por processos de combinação ou mistura de componentes, sendo avaliadas a elevação de seu desempenho mecânico através da comparação dos resultados de resistência, elasticidade, alongamento e ruptura (Levy Neto e Pardini, 2006; Carvalho e Cavalcanti, 2006).

O comportamento mecânico dos materiais compósitos em tração é determinado pela interação entre a matriz e o material de reforço. Em função dessa interação, o limite de resistência à tração (LR , Equação (3)) depende da contribuição de ambos os constituintes, conforme ilustrado na Figura 3(c) (Gama, 2017).

O material que constitui a fibra, nesta representação gráfica qualitativa (Figura 3(c)), exibe um comportamento mecânico elástico-linear. Já para a matriz, o material que a constitui é representado por um comportamento elástico não linear, típico de materiais poliméricos. O material compósito, mecanicamente, apresenta um comportamento combinado das propriedades mecânicas da matriz e da fibra, e sua curva tensão-deformação exibe um comportamento intermediário em relação às curvas

tensão-deformação da fibra e da matriz (Meyers e Chawla, 1982; Levy Neto e Pardini, 2006).

Na maioria dos compósitos reforçados por uma matriz polimérica, ocorre a distribuição aleatória dos comprimentos das fibras. Devido à diferença de deformação entre a fibra e a matriz, as fibras são tensionadas em direção ao seu eixo, induzindo tensões de cisalhamento. À medida que o esforço de tração aumenta, a tensão na fibra também cresce até que a resistência máxima à tração da fibra seja excedida. Devido à sua área de seção transversal ser pequena, ocorre o rompimento da fibra durante o processo de deformação do compósito. A fibra continuará a se romper até que as tensões de cisalhamento em sua superfície não sejam mais suficientes para causar sua ruptura (Meyers e Chawla, 1982; Gama, 2017).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ensaio de tração é uma ferramenta essencial para a caracterização mecânica dos materiais, permitindo determinar propriedades como módulo de elasticidade, limite de escoamento, resistência à tração, ductilidade e tenacidade. A análise da curva tensão-deformação fornece informações fundamentais para a seleção de materiais e o dimensionamento de componentes estruturais.

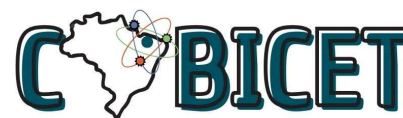
Além disso, a comparação do comportamento mecânico de metais, polímeros, elastômeros, cerâmicas e compósitos evidencia a influência da estrutura e da composição nas propriedades dos materiais. Dessa forma, o ensaio de tração permanece como um método indispensável para a pesquisa, o desenvolvimento e o controle de qualidade em engenharia de materiais.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ASKELAND, D. R. et al. The science and engineering of materials. 6. ed. Stamford: Cengage Learning, 2006.
- BEER, F. P. Mechanics of materials. New York: McGraw-Hill, 1982.
- CALLISTER, W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CARVALHO, L. H. de; CAVALCANTI, W. S. Propriedades mecânicas de tração de compósitos poliéster/tecidos híbridos sisal/vidro. Polímeros, v. 16, n. 1, p. 33–37, 2006.



- CASSU, S. N.; FELISBERTI, M. I. Comportamento dinâmico-mecânico e relaxações em polímeros e blendas poliméricas. *Química Nova*, v. 28, n. 2, p. 255–263, 2005.
- COUTINHO, F. M. B. et al. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. *Polímeros*, v. 13, n. 1, p. 1–13, 2003.
- FARIDMEHR, I. et al. Correlation between engineering stress-strain and true stress-strain curve. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, v. 2, n. 1, p. 53–59, 2014.
- GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão sistemática de literatura: conceituação, produção e publicação. *Logeion: Filosofia da Informação*, v. 6, n. 1, p. 57-73, 2019.
- GAMA, D. P. N. Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche. 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya de Pós-Graduação, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.
- GARCIA, A. et al. Ensaaios dos materiais. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- GERE, J. M.; GOODNO, B. J. Mecânica dos materiais. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.
- HIBBELER, R. C. Resistência dos materiais. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- LIZ, J. V. de et al. Methodology for analyzing the propagation of uncertainty in the mechanical properties of rectangular cross-section specimens under three-point bending tests. *Construction and Building Materials*, v. 471, p. 140608, 2025.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. Técnicas de pesquisa. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2013.
- MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. Princípios de metalurgia mecânica. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.
- SHIGLEY, J. E. Mechanical engineering design. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1972.
- SOUZA, S. A. de. Ensaaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Blucher, 1982.
- ZHU, X.-K.; JOYCE, J. A. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 85, p. 1–46, 2012.