



VIII Encontro de Iniciação Científica e
Tecnológica
VIII ENICT
ISSN: 2526-6772
IFSP – Câmpus Araraquara
19 e 20 de outubro de 2023



Estudo comparativo da tensão de escoamento do aço SAE 1045 normalizado através dos ensaios de tração unidirecional e de flexão engastada

MARCOS FILIPI CASSEMIRO CRUZ¹, SÍLVIO APARECIDO VERDÉRIO JÚNIOR², CELIO CAMINAGA³

¹ Graduando em Engenharia Mecânica, Programa PIBIFSP, IFSP - Câmpus Araraquara - marcos.filipi@aluno.ifsp.edu.br

² Docente, Instituto Federal de São Paulo - Câmpus Araraquara - silvioverderio@ifsp.edu.br (Coorientador)

³ Docente, Instituto Federal de São Paulo - Câmpus Araraquara - caminaga@ifsp.edu.br (Orientador)

Área de conhecimento (Tabela CNPq): Área Exemplo – 30.30.40-32

RESUMO: O ensaio de tração unidirecional, pela facilidade de execução e reprodutibilidade dos resultados, é o tipo de ensaio mais utilizado para determinar propriedades mecânicas em materiais metálicos. Porém, em materiais de natureza frágil sujeitos a esforços de flexão, o ensaio de flexão é o mais indicado. Entretanto, o ensaio de flexão em materiais frágeis possui uma grande dispersão dos resultados, sendo recomendado aumentar o número de corpos de prova na amostra. Este trabalho tem como objetivo comparar o limite de escoamento obtido através dos ensaios de flexão engastada e de tração unidimensional, em barras com seção transversal quadrada e circular, do aço SAE 1045, na condição metalúrgica normalizado. Os resultados obtidos demonstram diferenças entre a propriedade mecânica analisada, tensão de escoamento, para os corpos de prova com seção quadrada e circular, quando em comparação dos dois diferentes ensaios realizados. As análises dos resultados também indicam que a geometria do material ensaiado, quadrado ou circular, não influencia a magnitude dessas diferenças na propriedade analisada.

PALAVRAS-CHAVE: Aço SAE 1045; ensaio de flexão; ensaio de tração; propriedades mecânicas.

INTRODUÇÃO

O ensaio de flexão é amplamente utilizado para determinar propriedades mecânicas em materiais frágeis ou com elevada dureza, pois por causa de sua baixa ductilidade, inviabilizam a aplicação de outros ensaios, Garcia (2000). Existem três tipos de ensaios de flexão, flexão engastada, flexão três pontos e flexão quatro pontos.

De acordo com Souza (1982), os resultados das propriedades mecânica observadas durante o ensaio de flexão não são completamente confiáveis, esses resultados encontrados durante o ensaio podem variar até 25% em relação com a aplicação real, obrigando a realização de vários ensaios, para conseguir uma média mais confiável. Entre as propriedades que podem ser observadas ao realizar o ensaio de flexão estão: módulo de ruptura, módulo de resiliência, e módulo de elasticidade e módulo de tenacidade.

O ensaio de tração é o mais utilizado, principalmente por causa de sua facilidade de aplicação, e por fornecer os dados primordiais para um projeto ou fabricação (Garcia, 2000). Entre as informações que poder ser obtidas estão: tensão de ruptura, tensão de escoamento, módulo de elasticidade e módulo de resiliência. O presente trabalho busca complementar os estudos realizados por Bejo et al. (2021) e tem como objetivo comparar a propriedade mecânica, limite de escoamento, obtida durante o ensaio de flexão engastada e o ensaio de tração unidimensional, em aço 1045, na condição metalúrgica de normalização, em corpos de prova com seção transversal quadrada e seção transversal circular.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No ensaio de flexão é aplicada uma carga crescendo em uma barra em um determinado ponto geometricamente padronizado, então é medido esse valor de carga versus a deformação máxima (Garcia, 2000). É principalmente utilizado para determinar propriedades mecânicas de materiais frágeis ou com alto grau de dureza, como cerâmicas, ferro-fundido e aço-ferramenta. Em materiais dúcteis o ensaio de flexão praticamente não é utilizado, pois estes materiais são capazes de absorver grande parte das deformações que o ensaio de flexão aplica, não fornecendo resultados confiáveis.

Durante a execução do ensaio de flexão é possível determinar o limite de resistência do material, (Souza, 1982). Para conseguir obter outras propriedades mecânicas como módulo de ruptura ou resistência ao dobramento, valor máximo da tensão de tração ou compressão nas fibras extremas do corpo de prova, é utilizado a equação (1), fórmula da flexão em regime elástico, abaixo:

$$\sigma_f = \frac{M * c}{I} \quad (1)$$

Onde:

σ_f = Tensão de flexão obtida do ensaio de flexão;

M – momento máximo de flexão, calculado pela carga máxima aplicada no ensaio;

c – linha neutra em relação ao centroide do corpo de prova;

I – momento de inércia inicial da secção transversal do corpo de prova com relação ao seu eixo.

De acordo com Beer (2015), a equação (1) só é aplicada em situações em que está ocorrendo flexão pura, em um material de composição homogênea e que esteja na região elástica, ou seja, quando a lei de Hooke está sendo aplicada na barra por inteiro. Quando a tensão de escoamento é ultrapassada, ou quando o material é tão frágil que a relação da tensão e deformação se torna não-linear, se torna impossível aplicar a lei de Hooke, nesta situação a equação já não é mais válida.

O ensaio de flexão engastada consiste em um corpo de prova engastado em um aparato tipo morsa, que será submetido a um momento fletor, medindo durante o ensaio o momento aplicado e a deflexão da barra, Garcia (2000). Possibilita a análise de diversos fatores como composição química, tratamentos térmicos e parâmetro de controle de qualidade.

O tipo de ensaio de materiais mais utilizado para determinar propriedades mecânicas é o ensaio de tração unidimensional, principalmente pela sua capacidade de rápida reprodução, devido a sua simplicidade, Garcia (2000). Consiste em uma aplicação gradual de carga de tração unidimensional nas extremidades do corpo do corpo de prova, que será então tracionado até a sua ruptura.

De acordo com Garcia (2000), as propriedades que podem ser extraídas a partir do ensaio de tração unidimensional são: limite de resistência a tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, módulo de tenacidade, ductilidade, coeficiente de encruamento e coeficiente de resistência. E os resultados do ensaio são extraídos da curva tensão por deformação.

Conforme Callister (2012), em materiais com transição elastoplástica gradual, o ponto de escoamento pode ser atribuído como o limite de proporcionalidade, sendo este o ponto onde ocorre o afastamento da linearidade da curva. Nestes casos pode ser difícil conseguir determinar este ponto com precisão, para isso é convencionalmente utilizado uma linha reta paralela a região plástica do gráfico, depois é aplicado uma tensão de deformação previamente determinada. O ponto de interseção entre a reta auxiliar com a curva tensão-deformação é a tensão limite de escoamento.

METODOLOGIA

Matéria prima

Para a realização do trabalho, foram adquiridas barras de aço SAE 1045, com secção transversal quadrada de 8,0 mm de lado, e com secção transversal circular também de 8,0 mm de diâmetro, todas trefiladas a frio. Os materiais foram comprados com certificados de qualidade de procedência, e suas composições químicas estão apresentadas na Tabela 1 a seguir. Os parâmetros utilizados para a preparação (tratamento térmico de normalização), foram consultados nos livros ASM Handbook (1991) e Chiaverini (1996).

TABELA 1. Composição química das matérias-primas em porcentagem (%).

Material	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al
SAE 1045 Quadrado	0,44	0,2	0,62	0,012	0,025	0,03	0,01	0,01	-
SAE 1045 Circular	0,43	0,224	0,675	0,007	0,205	0,0259	0,0114	0,0184	0,0404

Fonte: Certificados de qualidade dos fornecedores.

Realização dos ensaios mecânicos de tração unidimensionais

Para a realização do ensaio de tração unidimensional, foi utilizado a máquina de ensaios universal EMIC DL 10000, com capacidade de 100 KN, com uma célula de carga de 100 KN e um extensômetro de 50 mm. Todos os parâmetros aplicados estão de acordo com a norma técnica ABNT NBR ISO 6892-1:2018. Para melhor garantir que houvesse a ruptura nos corpos de prova, foi utilizada uma velocidade de ensaio de 5 mm/min, com finalização na ruptura, ou quando a carga chegasse a 9,5 toneladas. Foram ensaiados três corpos de prova para cada amostra (seção transversal circular e seção transversal quadrada).

Após o ensaio de tração foram analisadas as tensões de escoamento de engenharia com uma pré-deformação de 0,2% (ou o limite de escoamento inferior, quando apresentar patamar de escoamento), sendo esta tensão de escoamento utilizada na comparação com os resultados dos ensaios de flexão.

Realização dos ensaios mecânicos de flexão engastada

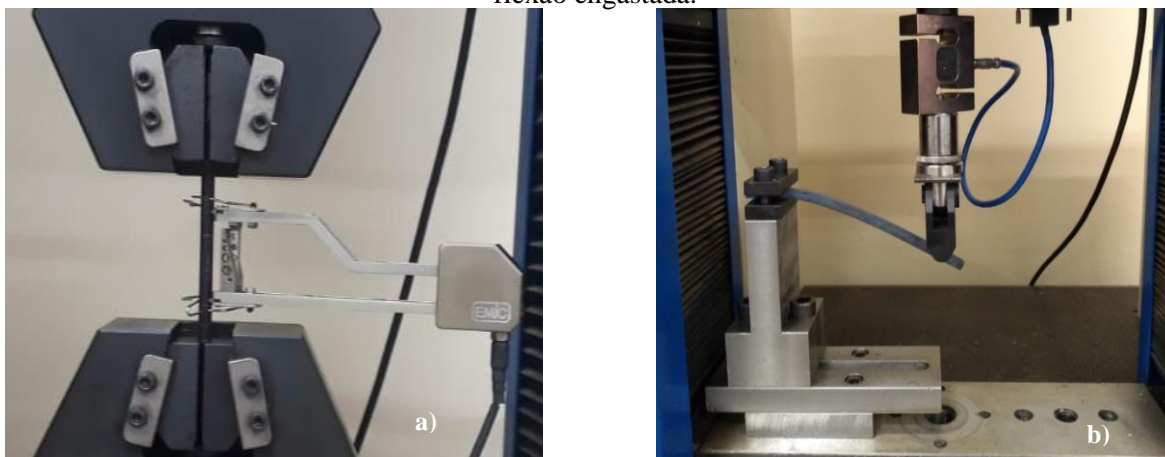
Para a realização do ensaio de flexão engastado foi utilizado a máquina de ensaios universal EMIC DL 10000, com capacidade de 100 KN, com um dispositivo de ensaio de flexão engastada (que foi projetado e construído por um trabalho de iniciação científica anterior a este). Utilizou-se uma célula de carga de 5 KN. O comprimento entre o engaste ao ponto de aplicação da carga foi de 128 mm. Também foram ensaiados três corpos de prova para cada amostra.

As propriedades analisadas para esse ensaio foram: momento fletor de escoamento, para uma pré-deformação de 0,2mm, e tensão normal de flexão no ponto de escoamento do material, calculado pela fórmula da flexão (equação 1).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

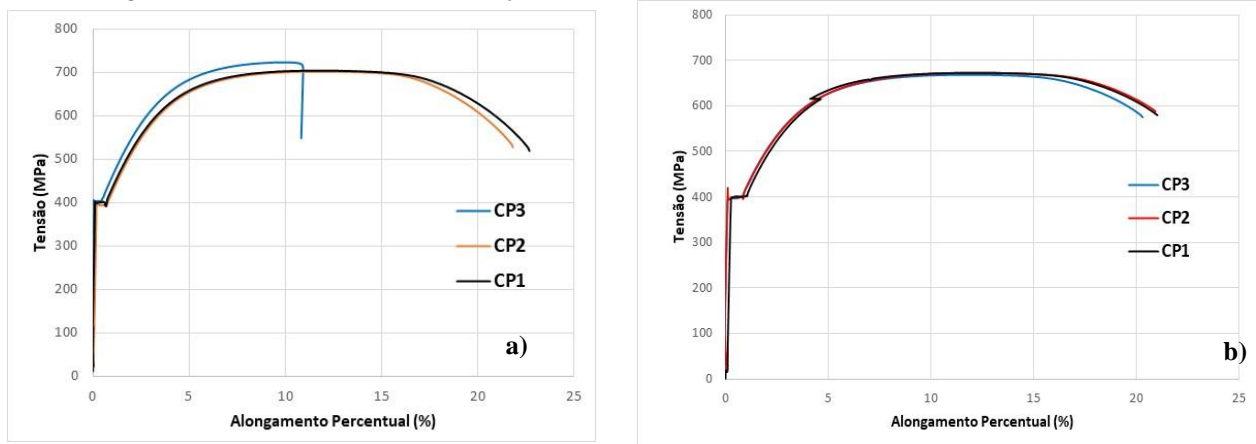
A Figura 1 apresenta os materiais fixados nos dispositivos de ensaio, durante os ensaios de tração unidirecional (Figura 1a) e flexão engastada (Figura 1b). A Figura 2 apresenta as curvas obtidas no ensaio de tração unidirecional e a Figura 3 apresenta as curvas obtidas no ensaio de flexão engastada.

Figura 1 – Imagens dos materiais durante os ensaios: a) ensaio de tração unidirecional; b) ensaio de flexão engastada.



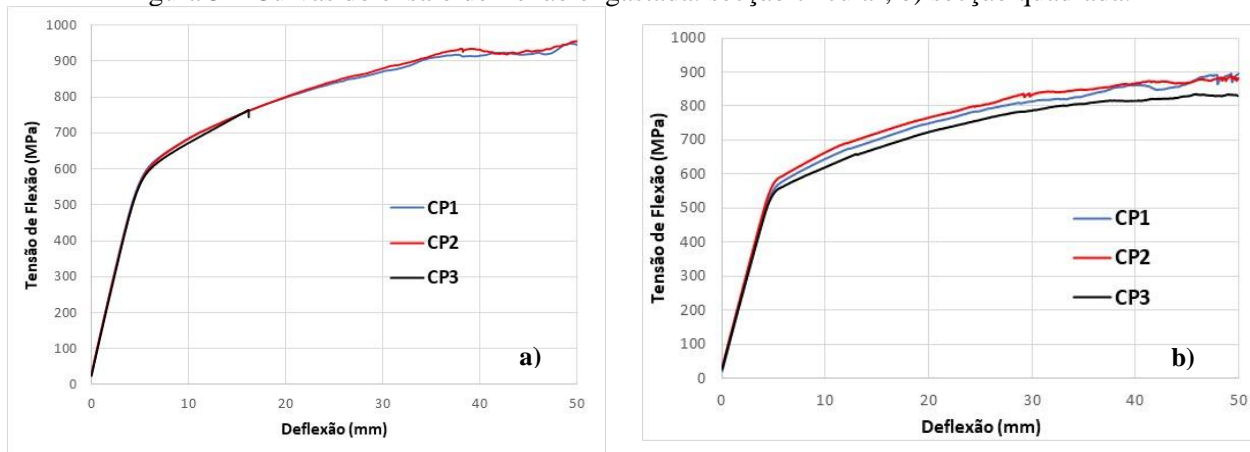
Fonte: Próprio Autor.

Figura 2 – Curvas do ensaio de tração unidirecional: secção circular; b) secção quadrada.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 3 – Curvas do ensaio de flexão engastada: secção circular; b) secção quadrada.



Fonte: Próprio Autor.

A partir da análise dos dados obtidos nos ensaios de tração e flexão engastada realizados, foi construída a Tabela 2, na qual apresenta os valores médios da tensão de escoamento obtida do ensaio de tração unidirecional (σ_e) e da tensão de flexão no escoamento obtida do ensaio de flexão engastada (σ_{fe}), com seus respectivos desvios padrão (Dp) para cada amostra ensaiada (circular e quadrada).

Tabela 2 - Valores médios do limite de escoamento obtidos em ensaio de tração unidirecional e flexão engastada.

Amostra	Ensaio de Tração	Ensaio de Flexão Engastada
	$\sigma_e \pm Dp$	$\sigma_{fe} \pm Dp$
SAE 1045 Normalizado circular	$395,37 \pm 6,70$	$558,81 \pm 15,04$
SAE 1045 Normalizado quadrado	$397,08 \pm 3,65$	$561,08 \pm 14,10$

Fonte: próprio Autor.

Semelhante ao que foi proposto por Bejo et al. (2021), foi calculado a razão de tensão (Rt) através da equação (2), com resultado adimensional.

$$Rt = \frac{\sigma_{fe}}{\sigma_e} \quad (2)$$

Sendo:

σ_{fe} = Tensão de flexão no escoamento média obtida do ensaio de flexão engastado;

σ_e = Tensão de Escoamento média obtida do ensaio de tração unidirecional;

A razão de tensão para o aço SAE 1045 Normalizado circular foi 1,413, enquanto que para o SAE 1045 Normalizado quadrado também foi de 1,413. Esses resultados diferem dos obtidos por Bejo et al. (2021) que encontrou uma razão de tensão de 1,62 para o mesmo aço, na mesma condição metalúrgica. Isso pode ser justificado pelo fato que os ensaios de flexão não foram de mesma configuração (layout), sendo que para este trabalho foi o ensaio de flexão engastada, enquanto que para os valores publicados por Bejo et al. (2021) foi empregado o ensaio de flexão três pontos.

O resultado das razões de tensão de 1,413 para ambos os materiais ensaiados, pode caracterizar que a geometria do material ensaiado não altera essa razão. Isso poderá ser confirmada no decorrer da pesquisa em andamento, que verificará a influência da geometria no resultado da razão de tensão, realizando também os ensaios de flexão três pontos e flexão quatro pontos.

CONCLUSÕES

Pode-se concluir que ocorre uma diferença de valores entre a tensão de escoamento em tração e tensão de escoamento em flexão para o material ensaiado. Isso pode indicar que a tensão de escoamento de flexão obtida pela fórmula da flexão pode superdimensionar o elemento em análise, já que a mesma é empregada em cálculos de dimensionamento de estruturas. Entretanto, mais ensaios devem ser realizados para confirmar essa hipótese. Observou-se que a geometria do produto não influencia a razão de carga para o ensaio de flexão engastada. Outros estudos devem ser conduzidos para outras configurações de ensaio.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Câmpus Araraquara, pelo fornecimento dos equipamentos e da força de trabalho e também pelo fornecimento da bolsa de iniciação científica ao aluno envolvido na pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASM Handbook, **Heat Treating**, vol. 4, 1991.

ABNT NBR ISO 6892-1, **Materiais metálicos —Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**, 70p., 2018.

BEJO, F.G., VERDÉRIO JÚNIOR, S.A., CAMINAGA, C., **Estudo comparativo das propriedades mecânicas dos aços SAE 1045 e SAE 1020, em diferentes condições metalúrgicas, através dos ensaios de tração unidirecional e flexão em três pontos**. Revista Matéria, vol. 26, n. 3, 2021.

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, 8ªed., LTC: Rio de Janeiro, 2012.

BEER, F. P. et al., **Mecânica dos Materiais**, 7ªed., Porto Alegre: McGraw-Hill Education, 2015.

CHIAVERINI, V., **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento: volume II**. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986.

GARCIA, A., **Ensaio dos Materiais**. LTC: Rio de Janeiro, 1ª Edição, 2000.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5ªed., São Paulo: Edgard Blucher, 1982.