

MÉTODO NUMÉRICO PARA A DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE TENACIDADE DE MATERIAIS A PARTIR DE ENSAIOS DE TRAÇÃO

Autores: Pedro Henrique Gwiggner SERIGHELLI¹, Cristiano José TURRA¹, David Roza JOSÉ².

¹ Graduando em Engenharia Mecânica, Instituto Federal Catarinense (IFC), Campus Luzerna, Brasil.

² Mestre em Engenharia Mecânica, professor do Instituto Federal Catarinense (IFC), Campus Luzerna, Brasil.

Introdução

A disponibilidade dos materiais nas mais diversificadas aplicações da engenharia é uma das grandes ambições dos pesquisadores da área. A pesquisa por novas ligas metálicas com boa combinação de propriedades mecânicas conflitantes (dureza, resistência mecânica, ductilidade e tenacidade) é intensa e acelerada. Para isso os laboratórios de pesquisa realizam diversos ensaios mecânicos nos materiais a fim de obter valores quantitativos dessas propriedades, garantindo a eficiência e segurança na aplicação das ligas. O ensaio de tração é um dos ensaios mais completos em termos de obtenção de propriedades mecânicas, tais como o módulo de elasticidade, limite de escoamento, resiliência, coeficiente de Poisson, limite de resistência, alongamento, limite de ruptura e tenacidade [1]. Porém os equipamentos que realizam os ensaios de tração geralmente não disponibilizam o valor imediato de algumas propriedades mecânicas, como por exemplo a tenacidade, definida como a energia necessária para a ruptura [1], obrigando o próprio usuário a calcular as propriedades não fornecidas. Para isso, Lessels desenvolveu equações objetivando calcular o valor da tenacidade [2]. Tais equações apresentam boa aproximação em alguns casos. Porém a incerteza dos resultados destas formulações por vezes beira o inaceitável, além de ser necessário saber - *a priori* - se o material é frágil ou dúctil a fim de se utilizar a formulação adequada. Para minimizar erros nos cálculos de tenacidade este estudo visou utilizar um método numérico que utiliza dados experimentais obtidos para realizar as iterações, a regra do trapézio, por ser muito fácil de se aplicar e por possibilitar uma boa aproximação do valor verdadeiro quando utilizado com um tamanho de passo muito pequeno no domínio (distância entre pontos). Estudos [3] que utilizaram esse método, mesmo com um passo muito grande, demonstraram valores satisfatórios em relação ao cálculo da tenacidade por meio do ensaio de tração.

Material e Métodos

Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado segundo a norma ASTM E8M [5], utilizando três corpos de prova do aço SAE 8620, e três corpos de prova do aço SAE 1010, em uma máquina de

ensaios universal EMIC DL 10000 com transdutor de deslocamento embutido. A velocidade de ensaio utilizada foi de $5 \frac{mm}{min}$. O corpo de prova utilizado é representado pela Figura 1.

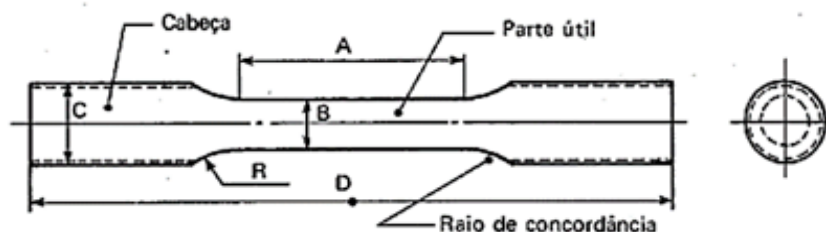


Figura 1: Representação das seções do corpo de prova utilizado. A – Comprimento base (75 mm), B – Diâmetro da parte útil (10 mm), C – Cabeça (25 mm), R – Raio de concordância, D – Comprimento total [1].

Os ensaios de tração que utilizam extensômetros de resistência elétrica que permitem a realização do ensaio até a ruptura do corpo de prova, fornecem diretamente a deformação específica do material, definida como a deformação por unidade de comprimento [mm/mm] [6], e é calculada através da Equação 1.

$$\varepsilon = \frac{(\text{comprimento final} - \text{comprimento inicial})}{\text{comprimento inicial}} \quad 1.$$

Neste estudo não foram utilizados extensômetros, e a deformação foi medida por meio do transdutor de deslocamento da garra superior da máquina de ensaios. Os pontos gerados a partir do ensaio, foram extraídos do software em um arquivo de texto (.txt), e inseridos no programa desenvolvido no MATLAB. A deformação específica foi calculada segundo a Equação 1, para que fosse possível plotar a curva Tensão x Deformação.

Formulações para Cálculo da Tenacidade

Para determinar o módulo de tenacidade existem formulações aproximadas que são utilizadas na engenharia. Seely (1947) [1] formulou uma equação para o cálculo do módulo de tenacidade para materiais dúcteis. A Equação 2 apresenta a formulação matemática descrita por Seely.

$$U_t = \frac{(\sigma_e + \sigma_m) * \varepsilon}{2} \quad 2.$$

Onde ‘ U_t ’ é a área abaixo da curva (módulo de tenacidade), ‘ σ_e ’ é a tensão de escoamento, ‘ σ_m ’ é a tensão máxima e ‘ ε ’ é a deformação específica. Esse método foi utilizado com os dados obtidos nos ensaios de tração, para comparar o método numérico com a formulação de Seely.

Regra do Trapézio

Para o cálculo do módulo de tenacidade, dado pela área abaixo da curva do gráfico Tensão x Deformação, gerado experimentalmente por ensaio de tração, utilizou-se o uma adaptação do método numérico de integração regra do trapézio, denominado regra do trapézio para segmentos desiguais [4]. Esta regra geometricamente, consiste em aproximar a integral de uma curva, pelas áreas de trapézios descritos sob esta curva, determinados por retas $f(x_1)$ até $f(x_2)$ em um passo x_1 até x_2 , $f(x_2)$ até $f(x_3)$ em um passo x_2 até x_3 e assim sucessivamente como mostra a Figura 2.

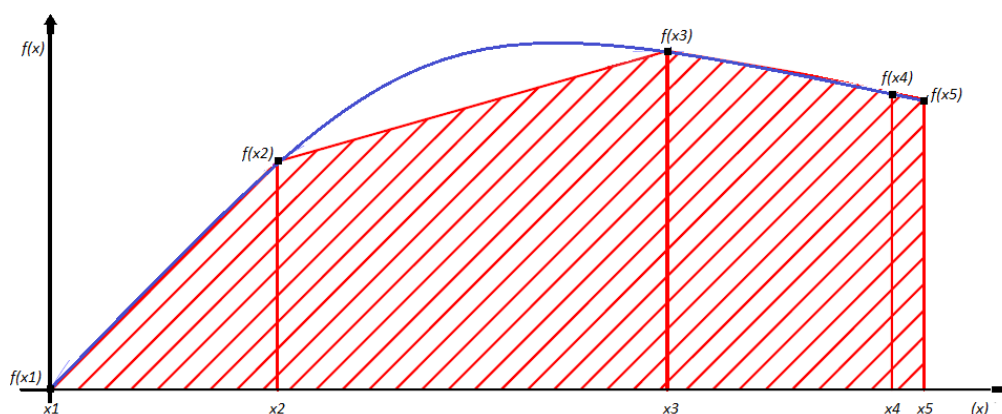


Figura 2: Regra do Trapézio para segmentos desiguais.

Onde a linha azul é a curva que descreve a função a qual está sendo aplicada a integração, e as regiões hachuradas são as áreas dos trapézios aplicados a curva. Desta forma o resultado da integral pela regra do trapézio para segmentos desiguais é dado pela Equação 3.

$$I = h_1 * \frac{f(x_2) + f(x_1)}{2} + h_2 * \frac{f(x_3) + f(x_2)}{2} + \dots + h_n * \frac{f(x_n) + f(x_{n-1})}{2} \quad 3.$$

Onde $h_1, h_2, \dots, h_n$ são as bases dos trapézios multiplicando suas respectivas alturas médias.

Resultados e discussão

O software da máquina de ensaios forneceu os vetores do tempo, deformação e força. A tensão foi calculada dividindo-se o vetor força pela área da seção transversal do corpo de prova.

Cálculo do Módulo de Tenacidade pela Formulação de Seely

Os ensaios de tração forneceram os valores de tensão de escoamento (σ_e), tensão máxima (σ_m) e deformação específica (ϵ). Com essas informações, foi utilizada a



formulação de Seely [2] para calcular o módulo de tenacidade. A Tabela 1 apresenta os valores do módulo de tenacidade para cada ensaio realizado.

Tabela 1: Cálculo do módulo de tenacidade para os aços SAE 1010 e SAE 8620.

Material	$\sigma_e [MPa]$	$\sigma_m [MPa]$	$\epsilon [\frac{mm}{mm}]$	$U_t [\frac{N*mm}{mm^2}]$
SAE 1010	293	350	0,385	124
	330	349	0,405	139
	381	427	0,425	171
SAE 8620	350	541	0,257	114
	360	558	0,273	125
	360	562	0,275	126

Regra do Trapézio

O programa desenvolvido permite calcular o módulo de tenacidade para ensaios de tração com uso de extensômetros de resistência elétrica, bem como por meio do transdutor de deslocamento embutido (da própria máquina de ensaios).

A Figura 3 mostra o gráfico obtido pelo programa desenvolvido para o Corpo de prova A do aço SAE 1010.

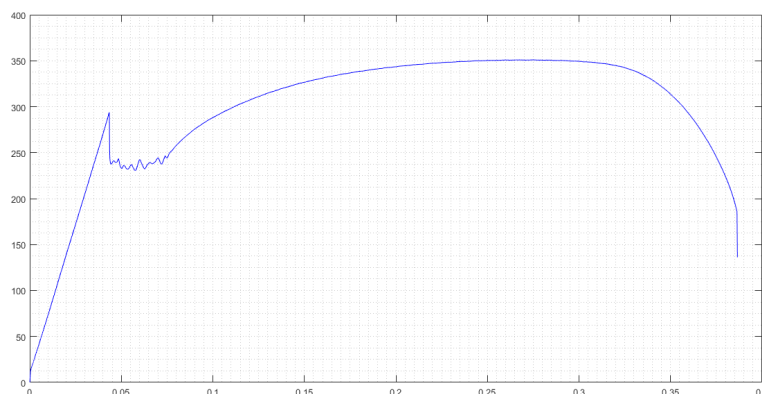


Figura 3: Gráfico Tensão [MPa]x Deformação específica [mm/mm] SAE 1010 - Corpo de prova A.

A Figura 4 mostra o gráfico obtido no ensaio de tração realizado para o corpo de prova A do aço SAE 8620.

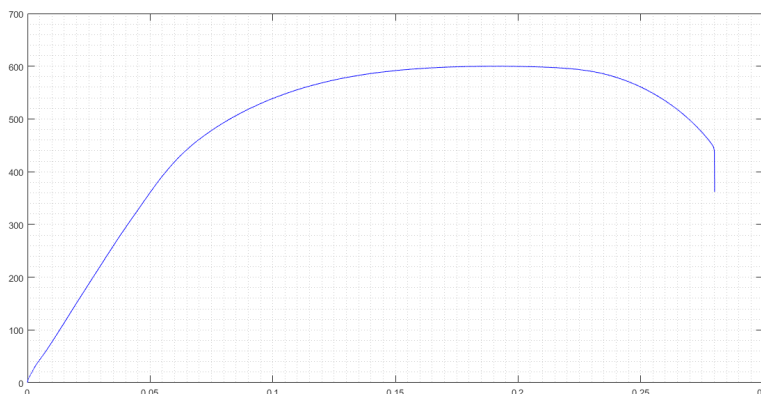


Figura 4: Gráfico Tensão [MPa] x Deformação específica [mm/mm] SAE 8620 - Corpo de prova A.



A Tabela 2 apresenta os valores calculados pelo programa desenvolvido, para o módulo de tenacidade ‘ U_t ’.

Tabela 2: Módulo de tenacidade calculado pelo método dos trapézios.

Material	Corpo de Prova	$U_t \left[\frac{N \cdot mm}{mm^3} \right]$
SAE 1010	A	115
	B	118
	C	153
SAE 8620	A	114
	B	120
	C	123

Conclusão

Após a realização dos ensaios de tração e da aplicação dos métodos numéricos para o cálculo do módulo de tenacidade, os autores deste trabalho concluíram que:

- O arquivo programado desenvolvido pelos autores apresenta maior exatidão para o cálculo do módulo de tenacidade em relação às formulações de Seely, já que o módulo de tenacidade é definido como a área abaixo da curva, e os métodos utilizados são próprios para cálculos de áreas;
- Os vetores originados pelo ensaio de tração (tensão e deformação), possuem um tamanho de passo consideravelmente pequeno devido à baixa velocidade de ensaio, garantindo uma boa estimativa no cálculo do módulo de tenacidade.
- Curvas Tensão x Deformação com maiores oscilações são mais suscetíveis a erros pelas formulações de Seely.

Referências

- [1] SOUZA, S. A: Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos. 5 Ed. São Paulo: Blucher, 1982. 286 pág.
- [2] LESSELLS, J. M. Strenght and Resistance of Metals. New York: John Wiley e Sons Inc, 1954.
- [3] LEMOS, G. V. B.; VIEIRA, D. M. M.; SANTOS, B. P. dos. O efeito da velocidade de deformação no ensaio de tração de um aço SAE 4340. p. 8, 2013.
- [4] CHAPRA, S. C. Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists. 5 Ed. São Paulo: Mc Graw Hill, 2008. 809 pág.
- [5] TESTING, A. S. for; MATERIALS. ASTM e 8m standart test metals for tension testing of metalic materials. 28 pág, 2013.
- [6] BEER, F. P.; JR., E. R. J. Resistência dos Materiais. 5 ed. Porto Alegre: Pearson, Makron Books, 2011. 800 pág.