

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA VELOCIDADE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS OBTIDAS VIA ENSAIOS DE PUNCIONAMENTO ESFÉRICO

Luiz Fernando Maia de Almeida

Rosenda Valdés Arencibia

Sinésio Domingues Franco

Juliano Oséias de Moraes

Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, Santa Mônica, Uberlândia – MG, 38408-100

lfmaiaa@gmail.com

rosenda.arencibia@ufu.br

sdfranco@ufu.br

j_oseias@yahoo.com

Resumo. A avaliação da vida útil residual e o potencial de possíveis falhas de componentes em operação é questão crítica na análise de segurança e confiabilidade das instalações industriais. Para otimizar as decisões relacionadas com a substituição ou extensão da vida dos equipamentos, os ensaios mecânicos baseados em técnicas que utilizam corpos de prova com dimensões reduzidas são eficientes, podendo ser considerados ensaios não destrutivos. Uma destas técnicas é o ensaio de puncionamento esférico (Small Punch Test), que consiste em puncionar um corpo de prova em forma de disco, com espessuras da ordem de 500 μm com uma esfera de metal duro e diâmetro conhecido. Este processo é semelhante à estampagem de chapas no que diz respeito às ferramentas do ensaio. O objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades mecânicas (limite de escoamento e limite de resistência) de dois materiais de alta resistência e baixa liga (ARBL) por meio de ensaios de puncionamento esférico. Adicionalmente, é analisada a influência da variação da velocidade de teste nas variáveis resposta. Os valores de limite de resistência para os dois materiais foram similares aos obtidos por meio de ensaios de tração, enquanto o limite de escoamento foi adequadamente caracterizado para o material menos resistente. Já o fator velocidade não provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores das propriedades mecânicas obtidas neste ensaio.

Palavras chave: Small Punch Test. Propriedades mecânicas. Velocidade de ensaio.

1. INTRODUÇÃO

Durante o seu funcionamento, muitos materiais estão sujeitos a esforços ou carregamentos significativos. Em tais situações, torna-se necessário conhecer as características do material e projetar o componente a partir do qual ele é feito, tal que qualquer deformação resultante não seja excessiva e não cause fratura. O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a sua resposta, ou deformação, a uma carga ou força aplicada.

Por meio da realização de experimentos de laboratório cuidadosamente projetados, que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço, as propriedades mecânicas dos materiais podem ser estimadas com elevada exatidão. Dentre os fatores que devem ser considerados estão a natureza da força aplicada e o tempo de sua aplicação, assim como as condições ambientais (Callister Jr., 2011).

Entretanto, em alguns casos, a composição química e as propriedades mecânicas do material utilizado na fabricação de um determinado equipamento não são conhecidas. Isso ocorre, por exemplo, com algumas estruturas de centrais elétricas ou da indústria petroquímica, especialmente as mais antigas, para as quais a documentação técnica não é precisa ou mesmo não existe. Desse modo, de forma a levantar as propriedades destes materiais e garantir a integridade das estruturas, incluindo análises de vida remanescente, é necessário a realização de ensaios não destrutivos.

Os ensaios mecânicos baseados em técnicas que utilizam corpos de prova de pequenas dimensões vêm sendo chamados de "mini testes". Eles conseguem fornecer informação relativa à resistência mecânica dos aços e outros materiais metálicos presentes nos equipamentos em operação, sujeitos a fenômenos de degradação ao longo do tempo e, com isso, determinar a vida útil residual dos mesmos com base nos resultados obtidos. Estes ensaios podem ser considerados não destrutivos, quando os corpos de prova extraídos são retirados de componentes com dimensões elevadas comparadas às do corpo de prova, não tendo assim efeitos significativos na resistência dos mesmos e garantindo a continuidade dos equipamentos em serviço (Hurst; Matocha, 2012).

Uma destas técnicas de ensaio em miniatura utilizada é o *Small Punch Test* (SPT), a qual teve seus primeiros trabalhos publicados por Manahan *et al.* (1981). Esta técnica consiste em puncionar um corpo de prova em forma de disco, com espessuras da ordem de 500 μm com uma esfera de metal duro e diâmetro conhecido. Durante esse puncionamento são medidos o deslocamento e a força até a ruptura. A partir da curva força por deslocamento são

estimadas as propriedades mecânicas. Esta técnica tem aplicação prática em equipamentos que possuam componentes mecânicos de elevadas dimensões, que foram submetidos a fenômenos de degradação ao longo do tempo. A indústria petrolífera e a nuclear são as que mais alavancaram esta tecnologia e possibilitaram seu estudo e desenvolvimento.

A Figura 1-a mostra um desenho esquemático do dispositivo do ensaio SPT, onde o corpo de prova (5) é apoiado na matriz inferior (2), sendo apertado em seguida pela matriz superior (1) e por fim carregado na zona central por ação de uma haste atuadora (3) que empurra a esfera (4) que irá deformá-lo até a ruptura. O aperto do corpo de prova entre as matrizes impõe que a deformação ocorra apenas na zona de contato com o punção.

O objetivo do ensaio é produzir uma curva de carga por deslocamento do punção e/ou carga por deflexão do corpo de prova que contenha informações das deformações elástica e plástica e das propriedades de resistência do material. Uma curva típica desse ensaio é mostrada na Fig. 1-b.

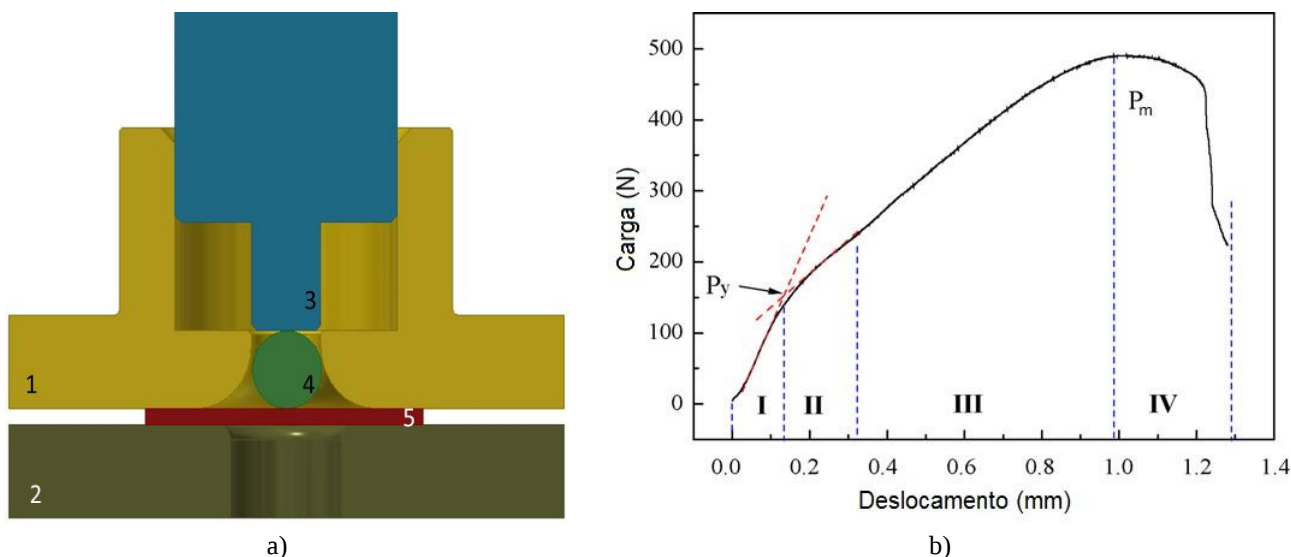


Figura 1. (a) Esquema simplificado do dispositivo do ensaio SPT (b) Curva carga x deslocamento típica dos ensaios SPT (Wang *et al.*, 2008)

Na curva da Fig. 1-b é possível notar quatro estágios bem definidos. O primeiro estágio (I) corresponde à flexão elástica durante a qual todo o corpo de prova sofre deformação elástica. No estágio II inicia-se a deformação plástica, onde o volume de plasticidade que surge no centro do corpo de prova, na zona de contato com o punção, aumenta progressivamente na direção da espessura e na direção radial. O terceiro estágio (III) corresponde ao alongamento da membrana, na qual a deformação não está associada às tensões provocadas pela flexão do corpo de prova, mas sim devido a uma tensão de escoamento na área de contato entre a esfera e o corpo de prova. Por fim, o quarto estágio (IV), corresponde à propagação da trinca principal que leva à ruptura do corpo de prova.

Além disso, são destacados dois pontos importantes, sendo P_y a força onde se tem o início da deformação plástica, usada no cálculo do limite de escoamento e P_m a força máxima obtida durante todo o ensaio, considerada para o cálculo do limite de resistência (Rodríguez *et al.*, 2009).

Várias equações foram desenvolvidas para permitir a obtenção das propriedades de tração, limite de escoamento (σ_y) e limite de resistência à tração (σ_{ut}), com base na curva força x deslocamento. A curva de resposta é relacionada com as propriedades mecânicas por meio de correlações matemáticas, que dependem das propriedades do material, da geometria do corpo de prova e do punção utilizado no ensaio. Para García *et al.* (2014), as equações que melhor relacionam os dados da curva com propriedades de tensão são as mostradas nas Eq. (1) e Eq. (2).

$$\sigma_y = \alpha_1 \cdot \left(\frac{P_y}{t^2} \right) + \alpha_2 \quad (1)$$

$$\sigma_{ut} = \beta_1 \cdot \left(\frac{P_m}{t} \right) + \beta_2 \quad (2)$$

Nas Equações (1) e (2), α_1 , α_2 , β_1 e β_2 são constantes dependentes principalmente do tipo de material, das dimensões do corpo de prova e dos parâmetros de ensaio e t é a espessura do corpo de prova utilizado. Além dessas propriedades, o ensaio SPT permite ainda calcular propriedades de tenacidade à fratura, bem como propriedades de fluência.

2. METODOLOGIA

Os testes foram conduzidos em um equipamento de ensaio que consiste em um punção esférico de 1,5 mm de diâmetro de metal duro (WC-Co) acoplado em uma haste atuadora, uma matriz superior de aperto, uma matriz inferior e a base de suporte. O deslocamento do punção é medido com dois LVDT com faixa nominal de 5 mm, enquanto a força aplicada é medida com uma célula de carga com capacidade de 0,5 kN a 2 kN.

Os corpos de prova testados possuem diâmetro de 8 mm e espessura de 0,350 mm. Estes foram fabricados a partir de dois aços de alta resistência, cuja composição química e propriedades mecânicas são mostradas nas Tab. 1 e Tab. 2, respectivamente. Foram realizados ensaios em três corpos de prova de cada material e, para o cálculo de propriedades a partir das curvas de resposta, foram utilizadas as equações propostas por García et al. (2014) e ajustadas por Almeida (2017).

Tabela 1. Composição química dos materiais utilizados nos ensaios (% em peso)

	C	S	Mn	Si	Cr	Cu	Ni	Mo	V	P	Al	Ti	Nb	B
Aço C	0,378	0,0078	0,912	0,268	1,14	0,227	0,132	0,321	0,0053	0,0130	0,0243	0,0028	-	0,0012
Aço F	0,290	0,0032	0,769	0,315	1,48	0,216	0,126	0,691	0,0097	0,0139	0,0383	0,0042	0,0239	0,0013

Tabela 2. Propriedades dos materiais utilizados nos ensaios

Material	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Limite de Escoamento σ_y (MPa)	Limite de resistência a tração σ_{ut} (MPa)	Dureza (HV10)
Aço C	209	949,41	1052,80	324,6
Aço F	210	775,83	848,42	266,6

Em seguida, foi investigado o efeito do fator velocidade nos valores de limite de escoamento e limite de resistência do aço F utilizando um planejamento de experimentos com um único fator. A velocidade foi investigada em três níveis (0,02 mm/s, 0,001 mm/s e 0,0005 mm/s). Para cada condição foram efetuadas três repetições, totalizando 9 ensaios. Para a análise dos resultados, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) por meio do *software* Statistica versão 7.1.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 mostra as curvas de resposta dos ensaios para os aços C e F. A partir da mesma, se conclui que o aço C apresentou forças máximas mais altas e deslocamentos do punção menores que o aço F. Isso ocorre, pois ele possui uma maior resistência à tração e uma menor ductilidade. Além disso, a curva de resposta do aço F permite uma maior distinção entre os estágios representados na Fig. 1-b, o que facilita a obtenção do parâmetro P_y utilizado no cálculo do limite de escoamento. Os valores médios das forças P_y e P_m , bem como os valores do limite de escoamento e limite de resistência calculados e os erros relativos aos valores do ensaio de tração são mostrados na Tab. 3.

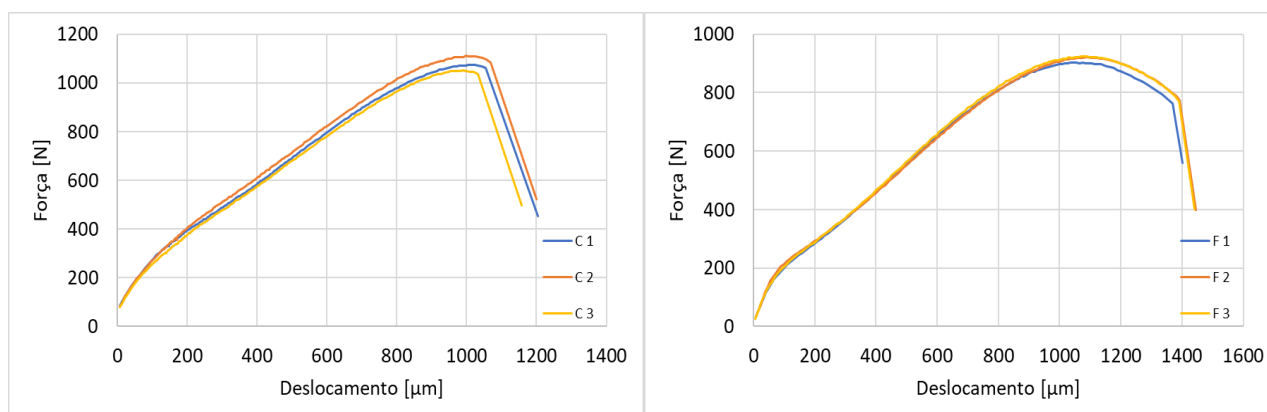


Figura 2. Curvas de resposta dos ensaios para o (a) aço C; (b) aço F

Tabela 3. Propriedades dos materiais calculadas a partir dos ensaios

Material	P_y (N)	P_m (N)	Limite de Escoamento σ_y (MPa)	Erro (%)	Limite de resistência a tração σ_{ut} (MPa)	Erro (%)
Aço C	390	1055	1102,08	16,08	1010,81	3,98
Aço F	258	915	703,89	8,48	820,73	3,26

A partir da Tab. 3, se conclui que os modelos matemáticos utilizados foram bem ajustados para o cálculo dos limites de resistência dos dois aços e do limite de escoamento do aço F. Já o limite de escoamento do aço C apresentou um erro elevado de 16,1 %, devido à dificuldade de se obter o parâmetro P_y da curva de resposta.

A Figura 3 mostra uma curva de resposta para cada velocidade na qual o aço F foi ensaiado. A partir da Fig. 3, nota-se que as curvas de resposta não apresentam divergências significativas ao longo da maior parte do ensaio. Este fato é indicativo de boa repetibilidade dos valores de força. A força máxima diminuiu ligeiramente com a diminuição da velocidade, apresentando um desvio de aproximadamente 20 N em relação à média, o que representa um desvio de apenas 2,2 %.

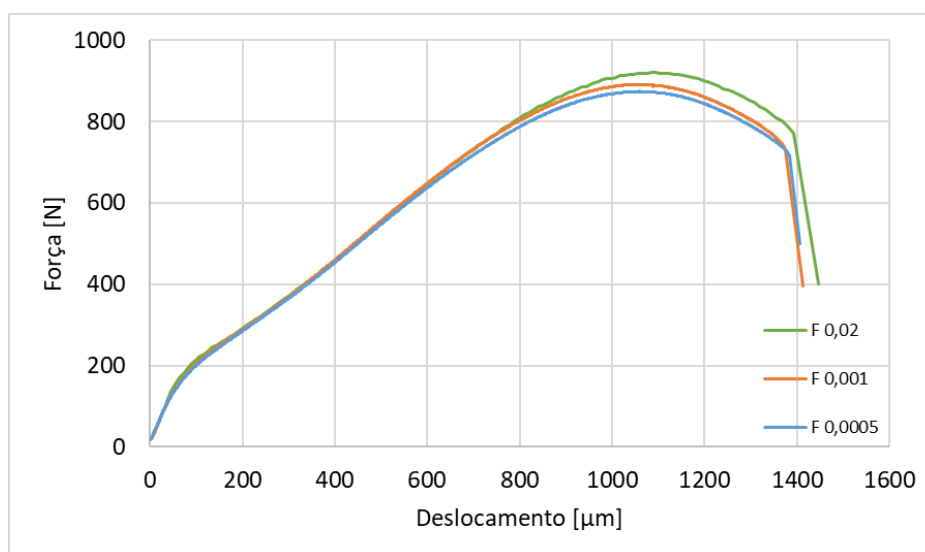


Figura 3. Curvas de resposta dos ensaios variando a velocidade

A partir da ANOVA com confiabilidade de 95 %, obteve-se valores de p de 0,919 para o efeito da velocidade no limite de escoamento e 0,054 para o efeito da velocidade no limite de resistência para o aço F. Como ambos valores de p foram maiores que $\alpha = 0,05$, não se pode afirmar que a variação da velocidade implica em resultados de propriedades diferentes. Portanto, esse fator não teve efeito estatisticamente significativo nos valores do limite de escoamento e limite de resistência do aço F nas condições experimentais avaliadas.

4. CONCLUSÕES

No estudo do cálculo de propriedades mecânicas de materiais de alta resistência utilizando ensaios de puncionamento, observou-se que as transições entre os estágios das curvas de resposta destes materiais são difíceis de serem percebidas, de modo que o limite de escoamento para estes materiais deve ser obtido por meio de modelos diferentes daqueles utilizados para materiais de menor resistência. Com relação ao limite de resistência, foi possível observar que o ensaio de puncionamento fornece resultados similares aos obtidos em ensaios de tração, se mostrando uma boa alternativa quando não existe material disponível para fabricar corpos de prova de grandes dimensões para realização de ensaios.

A variação da velocidade dos ensaios de 0,02 mm/s para 0,0005 mm/s, com 95 % de confiabilidade, não produziu efeitos estatisticamente significativos nos valores de limite de escoamento e limite de resistência do aço F nas condições experimentais deste trabalho.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, FAPEMIG e CNPq pelo apoio financeiro ao projeto, ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica/UFU e à Petrobras.

6. REFERÊNCIAS

- Almeida, L. F. M., 2017. “Simulação de ensaios de puncionamento esférico utilizando o método dos elementos finitos”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Callister Jr., W. D., 2011, “Ciência e engenharia de materiais: uma introdução”. LTC, Rio de Janeiro, 7ª edição.
- García, T. E., Rodríguez, C., Belzunce, F. J., Suárez, C., 2014. “Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test”. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol 582, p. 708-717.
- Hurst, R. C.; Matocha, K. Where are we Now with the European Code of Practice for Small Punch Testing? In: *2nd International Conference SSTT*, 2, 2012, Ostrava, Czech Rep. “Determination of Mechanical Properties of Materials by Small Punch and other Miniature Testign Techniques”. p. 4-18
- Manahan, O. K.; Argon, M. P.; Harling, A. S., 1981, “The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties”. *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 104, p. 1545-1550.
- Rodríguez, C.; García, J.; Cárdenas, E.; Belzunce, F. J.; Betegón, C., 2009, “Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch Test”. *Welding Journal*, Vol. 88, p. 188-192.
- Wang, Z.-X.; Shi, H.-J.; Lu, J.; Shi, P.; Ma, X.-F., 2008, “Small punch testing for assessing the fracture properties of the reactor vessel steel with different thicknesses”. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, p. 3186-3193.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

ANALYSIS OF THE TEST VELOCITY ON MECHANICAL PROPERTIES OBTAINED BY MEANS OF THE SMALL PUNCH TEST

Luiz Fernando Maia de Almeida

Rosenda Valdés Arencibia

Sinésio Domingues Franco

Juliano Oséias de Moraes

Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, Santa Mônica, Uberlândia – MG, 38408-100

lfmaiaa@gmail.com

rosenda.arencibia@ufu.br

sdfranco@ufu.br

j_oseias@yahoo.com

Abstract. The evaluation of residual life and the potential of possible failures of components in operation are critical questions in the analysis of safety and reliability of industrial facilities. Miniaturized tests can be efficient to optimize decisions related to the replacement or extension of equipment life, besides of being considered non-destructive tests. One of these tests is the small punch test (SPT), a process that is like the process of sheet stamping. The SPT uses a disk-shaped specimen with thickness of approximately 500 µm which is firmly clamped between two circular dies and is bi-axially strained until failure into a circular hole by a sphere with known diameter. In this study, mechanical properties (yield strength and ultimate tensile strength) of two high strength low alloy (HSLA) steels were evaluated by means of SPT. Also, the influence of the test velocity was analyzed on the response of the test. Ultimate tensile strengths of both materials were close to those obtained by means of the tensile test, while yield strength was well characterized for the less resistant material. The test velocity, however, was not a significant factor to evaluate the mechanical properties in this test.

Keywords: Small Punch Test, mechanical properties, test velocity

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.