

SIMULAÇÃO DE ENSAIOS DE PUNCIONAMENTO ESFÉRICO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Luiz Fernando Maia de Almeida, Universidade Federal de Uberlândia, lfmaiaa@gmail.com

Sonia A. Goulart de Oliveira, Universidade Federal de Uberlândia, sgoulart@ufu.br

Sinésio Domingues Franco, Universidade Federal de Uberlândia, sdf franco@ufu.br

Resumo: A avaliação da vida útil e residual e o potencial de possíveis falhas de componentes em operação é uma questão crítica na análise de segurança e confiabilidade das instalações industriais. De forma a otimizar as decisões relacionadas com a substituição ou extensão da vida dos equipamentos, são necessárias técnicas de monitoração da degradação dos materiais ao longo do ciclo de vida destes equipamentos. Os ensaios mecânicos baseados em técnicas de ensaio em pequenas amostras são eficientes para caracterizar as propriedades mecânicas dos componentes, além de serem considerados ensaios não destrutivos. Uma destas técnicas é o ensaio de puncionamento esférico (Small Punch Test), que consiste em puncionar uma amostra em forma de disco, com espessuras da ordem de 500 μm com uma esfera de metal duro e diâmetro conhecido. O objetivo deste trabalho é realizar a simulação destes ensaios de puncionamento esférico utilizando o método dos elementos finitos. Através da simulação, será realizado um estudo dos efeitos das variações de parâmetros, tais como a força da carga de aperto e do atrito nos resultados do ensaio de puncionamento.

Palavras-chave: Small Punch Test, propriedades mecânicas, método dos elementos finitos

1. INTRODUÇÃO

Muitos materiais, quando em serviço, estão sujeitos a esforços ou carregamentos, como por exemplo, a liga de alumínio a partir da qual a asa de um avião é construída e o aço no eixo de um automóvel. Em tais situações, torna-se necessário conhecer as características do material e projetar o membro 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.

As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela realização de experimentos de laboratório cuidadosamente projetados, que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço. Fatores que devem ser considerados incluem a natureza da carga aplicada e a duração de sua aplicação, assim como as condições ambientais. (Callister Jr., 2011)

Porém, algumas vezes, a constituição e as propriedades mecânicas do material usado 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 de ensaio em pequenas amostras 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 as amostras extraídas são retiradas de componentes com dimensões elevadas comparadas às da amostra, não tendo assim efeitos significativos na resistência dos mesmos e garantindo a continuidade dos equipamentos em serviço. (Hurst; Matocha, 2012)

Uma das técnicas de ensaio em miniatura utilizadas é o Small Punch Test (SPT), a qual teve seus primeiros trabalhos publicados por Manahan et al. (1981), que consiste em puncionar uma amostra 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 mostra um desenho esquemático do dispositivo do ensaio SPT, onde o corpo de prova (4) é colocado em um orifício situado na matriz inferior (2), sendo apertado em seguida pela matriz superior (1) e por fim carregado na zona central por ação de um punção esférico (3) que irá deformá-lo até a ruptura.

O tipo de ensaio SPT mais comum é o chamado "Small Punch Bulge Test" (SPBT), onde o corpo de prova é engastado firmemente entre as matrizes de aperto, impondo assim que a deformação ocorra apenas na zona de contato com o punção.

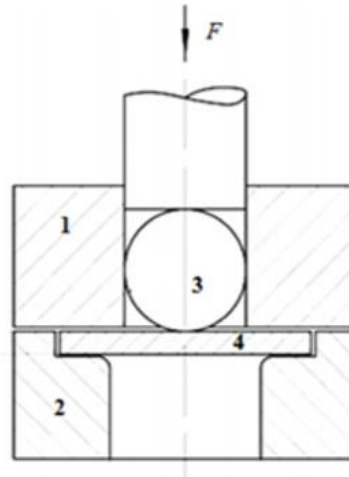


Figura 1: Esquema simplificado do dispositivo do ensaio SPT (Wang et al., 2008)

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. 2.

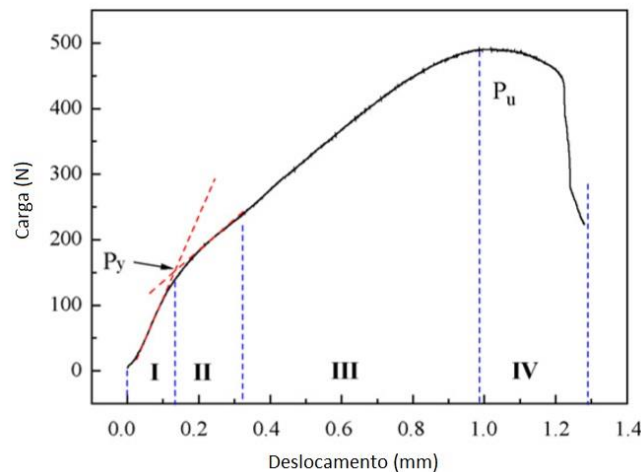


Figura 2: Curva carga x deslocamento típica dos ensaios SPT (Wang et al., 2008)

Na curva é possível notar quatro regiões bem definidas. 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 a amostra. Por fim, o quarto estágio (IV), corresponde à propagação da trinca principal que leva à ruptura da amostra.

Várias equações foram desenvolvidas para permitir a obtenção das propriedades de tração (limite de escoamento e limite de ruptura) com base na curva carga x deslocamento. Ela é relacionada com as propriedades mecânicas através 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 na Eq. 1 e Eq. 2.

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

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

Onde, 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, sendo considerada padrão $t = 0,5$ mm.

Além dessas propriedades, o ensaio SPT permite ainda calcular propriedades de tenacidade à fratura, bem como propriedades de fluência.

2. METODOLOGIA

Os ensaios experimentais de SPT foram realizados em amostras de aço ABNT 1010, cujas propriedades são mostradas na Tab. 1.

Tabela 1: Propriedades mecânicas do aço 1010 utilizado nos ensaios.

Propriedades do material	Aço 1010
Módulo de Elasticidade (GPa)	231,39
Limite de Escoamento (MPa)	308,47
Limite de Resistência (MPa)	397,68
Alongamento (%)	25

As simulações foram feitas utilizando o software de elementos finitos STAMPACK® que utiliza o método explícito para cálculo das equações diferenciais. Foi utilizado um modelo bidimensional axissimétrico para representar o experimento, uma vez que existe simetria ao longo de um eixo, simplificando assim os cálculos. O modelo pode ser observado na Fig. 3, onde estão representados um punção de 1,5 mm de diâmetro, um corpo de prova de 8 mm de diâmetro e 0,445 mm de espessura, bem como uma matriz superior de aperto e uma matriz inferior com raio de curvatura de 0,2 mm, representando o esquema do dispositivo utilizado nos experimentos.

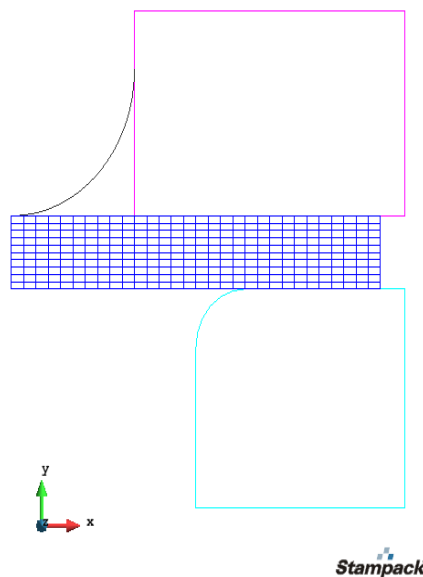


Figura 3: Modelo axissimétrico obtido no STAMPACK

Inicialmente, foram realizadas várias simulações com o objetivo de verificar a influência da carga de aperto da matriz superior, uma vez que essa informação não foi obtida experimentalmente. Nessas primeiras simulações o atrito foi desprezado. Em seguida, ao encontrar o melhor modelo, realizou-se então outra simulação, desta vez considerando um atrito de 0,7 por se tratar de contato entre dois metais a seco, com objetivo de comparar a curva de resposta com a curva obtida no experimento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações para encontrar a melhor carga de aperto do ensaio foram realizadas com cargas de 0,1; 0,15; 0,2 e 0,5 tn. A Figura 4 mostra os gráficos obtidos considerando cada um desses valores de carga de aperto.

É possível notar que para a carga de 0,5 tn, o gráfico se distanciou mais dos outros. Isso ocorreu, pois, essa carga começou a esmagar o corpo de prova, como pode ser visto na Fig. 5-a. Para as outras cargas, quase não se notou alteração no gráfico, porém a carga de 0,1 tn permitiu que o corpo de prova deslizasse na horizontal (Fig. 5-b), podendo ter o resultado comprometido quando o atrito fosse acrescentado. Foi decidido então que a carga ótima foi a de 0,15 tn.

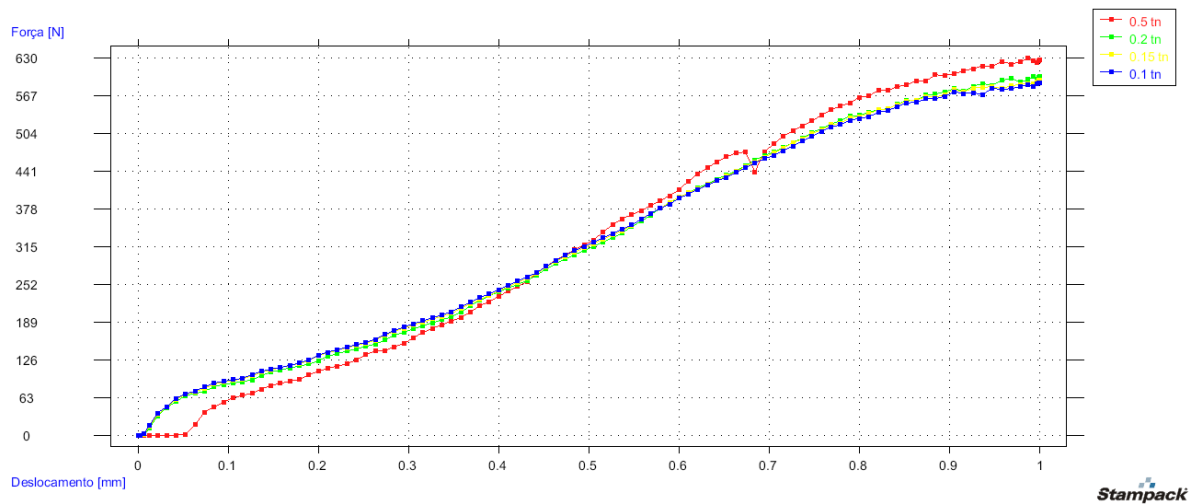


Figura 4: Comparação dos resultados obtidos nas simulações variando a carga de aperto.

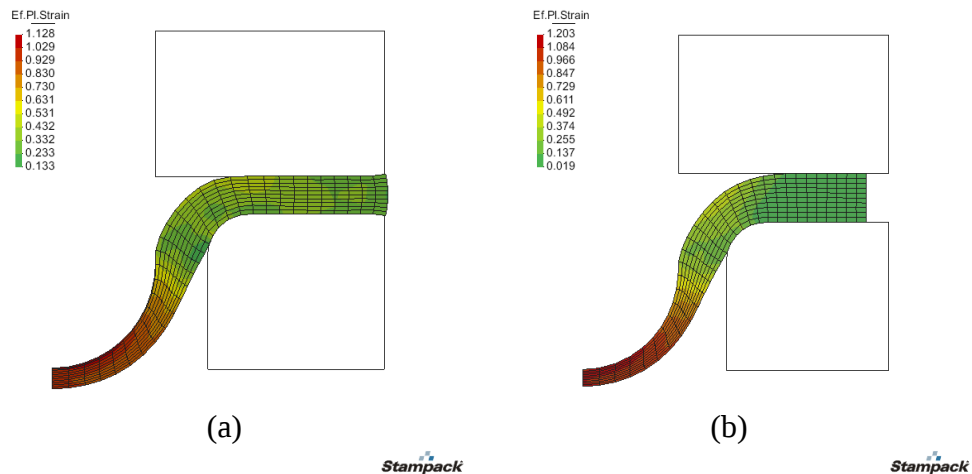


Figura 5: Deformações obtidas após as simulações considerando a carga de aperto de (a) 0,5 tn. (b) 0,1 tn.

A Figura 6 mostra a comparação da curva de resposta do ensaio SPT obtido experimentalmente e através da simulação.

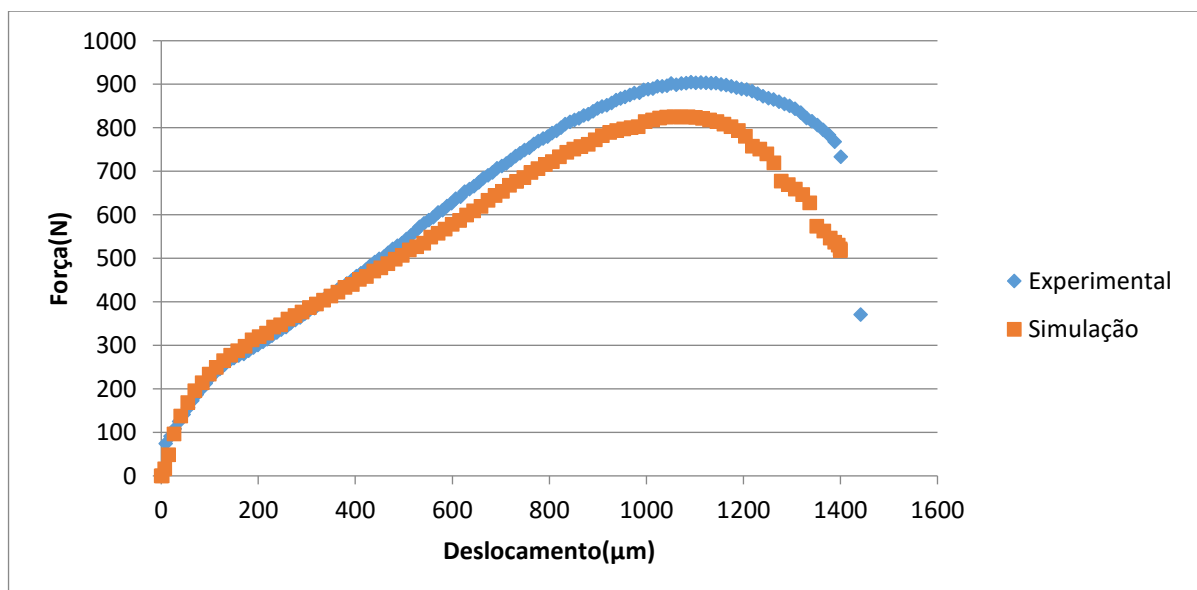


Figura 6: Gráfico comparativo das curvas obtidas no experimento e na simulação

Observa-se que na fase inicial quase não existiram desvios entre as duas curvas, podendo notar que a fase elástica do ensaio foi bem caracterizada pela simulação. Porém, a partir do estágio correspondente ao regime de membrana, as curvas apresentaram um desvio antes da carga máxima e consequente ruptura do corpo de prova. Isso possivelmente ocorre, pois, na simulação foi adotado um coeficiente de atrito constante ao longo de todo o ensaio. No experimento, a partir do escoamento, o corpo de prova tende a ter outro tipo de resistência ao movimento que leva a ser necessário uma carga maior para conseguir continuar o ensaio até a ruptura.

4. CONCLUSÕES

Sobre as simulações do ensaio SPT foi possível concluir que a carga de aperto é um parâmetro que deve ser levado em conta de modo que não esmague o corpo de prova nem o deixe livre o suficiente para deslocar horizontalmente. Valores entre esses extremos não apresentam muita influência na curva de resposta do ensaio.

Além disso, verificou-se que a fase elástica apresenta grande concordância com os resultados experimentais, de modo que a estimativa do limite de escoamento obtido tanto experimentalmente quando pela simulação terá um valor bem próximo.

Já a fase plástica requer um pouco mais de estudo, principalmente no que diz respeito ao atrito, que mostra um comportamento variável durante o ensaio experimental.

5. REFERÊNCIAS

- Callister Jr., W. D. “Ciência e engenharia de materiais: uma introdução”. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 706p.
- García, T. E.; Rodríguez, C.; Belzunce, F. J.; Suárez, C. “Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test”. *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 582, 2014, pp. 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”. pp. 4-18
- Manahan, O. K.; Argon, M. P.; Harling, A. S. “The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties”. *Journal of Nuclear Materials*, vol. 104, 1981, pp. 1545-1550.
- Wang, Z.-X.; Shi, H.-J.; Lu, J.; Shi, P.; Ma, X.-F. “Small punch testing for assessing the fracture properties of the reactor vessel steel with different thicknesses”. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 238, 2008, pp. 3186-3193.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo incluído neste trabalho.