

DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS *IN SITU* ATRAVÉS DE ENSAIOS DE MACROINDENTAÇÃO INSTRUMENTADA

Eduardo R. Nicolosi, PETROBRAS, nicolosi@petrobras.com.br

Sinésio D. Franco, UFU/FEMEC – Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste, sdfranco@ufu.br

Resumo. O ensaio de Macroindentação Instrumentada realizado *in situ*, por ser não destrutivo e utilizar equipamentos portáteis, é uma alternativa na determinação de propriedades mecânicas de tração de estruturas nas quais a retirada de corpos de prova, visando à realização de ensaios de tração, implica em grandes custos devido à interrupção da operação do equipamento, como é o caso de dutos de escoamento de petróleo. Trabalhos recentes têm mostrado a possibilidade de uso de ensaios de Macroindentação Instrumentada para estimar a tenacidade à fratura de aços usados na fabricação de dutos, inclusive com o potencial de monitorar a ocorrência de fragilização pelo hidrogênio nestes materiais. Além disso, por avaliar as propriedades mecânicas numa pequena região (profundidade de indentação não ultrapassa 300 μm), o ensaio também é utilizado na determinação de gradientes de propriedades mecânicas em soldas.

Palavras chave: macroindentação instrumentada, propriedades mecânicas, dutos.

1. INTRODUÇÃO

Inúmeras vezes, e pelas mais diversas razões, a constituição (ex.: composição química e processo de fabricação) e as propriedades mecânicas do material (ex.: limite de escoamento, limite de resistência, dureza e tenacidade à fratura) usado na fabricação de um determinado equipamento não são devidamente conhecidas. Isso ocorre, por exemplo, com as estruturas de condução de petróleo (dutos, tubulações e vasos). Assim, a avaliação da integridade estrutural fica comprometida, tornando-se mais complexa e de maior custo.

Em dutos de escoamento de petróleo, a avaliação da integridade inclui a determinação das localizações e dimensões de eventuais defeitos (ex.: corrosão localizada), o levantamento das tensões atuantes e o conhecimento das propriedades de tração e de tenacidade à fratura do material. Portanto, no caso de desconhecimento das propriedades do material, a garantia da integridade das estruturas, incluindo análises de vida remanescente, requer a realização de ensaios que podem ser de dois tipos: destrutivos, realizados em amostras retiradas da estrutura a ser analisada, ou *in situ* (não destrutivo) com equipamentos portáteis, no qual se insere o ensaio de Macroindentação Instrumentada.

O ensaio de Macroindentação Instrumentada permite obter, de forma rápida e com boa aproximação, as propriedades mecânicas dos materiais metálicos de equipamentos, sem que para isso seja necessária a retirada de amostras e, consequentemente, sem interrupção da operação do equipamento. Isso é extremamente importante na indústria petrolífera, já que a parada de equipamentos/sistemas envolve enormes custos operacionais e lucro cessante.

Outra grande aplicação da Macroindentação Instrumentada é a possibilidade de determinação de gradientes de propriedades mecânicas ao longo de seções de peças (ex.: espessura de tubos) e em soldas, incluindo a ZTA (zona termicamente afetada), pois um pequeno volume de material é avaliado, uma vez que são usados penetradores de pequeno diâmetro, variando de 0,4 mm até 1,5 mm, e a profundidade da indentação não ultrapassa 300 μm .

É possível encontrar na literatura uma extensa gama de trabalhos apresentando o uso de Macroindentação Instrumentada para determinar as propriedades mecânicas de diversos materiais metálicos, incluindo aços-carbono, aços ligados, aços inoxidáveis, ligas de níquel, ligas de alumínio, molibdênio, etc. (Murty *et al.*, 1999).

2. DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE TRAÇÃO E DUREZA DO MATERIAL

O ensaio de Macroindentação Instrumentada consiste na indentação controlada de uma superfície, usando um penetrador esférico, através de múltiplos ciclos de carregamento e descarregamento em um mesmo ponto. Os descarregamentos intermediários são parciais (entre 30 e 40%), enquanto ao final do ensaio ocorre o descarregamento total. A força aplicada e as respectivas profundidades de penetração são medidas continuamente através de uma célula de carga e de um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), respectivamente (Fig. 1 - b).

Os dados obtidos a partir do levantamento da curva “carga versus profundidade de penetração” (Fig. 1 - c) são usados para calcular os valores incrementais de tensão e deformação a partir da combinação de teorias da elasticidade e plasticidade, assim como relações semi-empíricas que governam o comportamento do material sob carregamentos de indentação (Ramos Neto *et al.*, 2004).

Haggag *et al.* (1989) propôs um modelo que permite estimar o limite de escoamento e o limite de resistência do material a partir dos dados da curva “carga versus profundidade de penetração”. Os sucessivos carregamentos e descarregamentos parciais permitem que a profundidade de indentação (h_p) associada à deformação plástica seja estimada (Fig. 2). O diâmetro plástico (d_p) pode ser determinado a partir de h_p se não há ocorrência pronunciada de material empilhado ou deslocado entorno da indentação, fenômeno conhecido como *pile-up*.

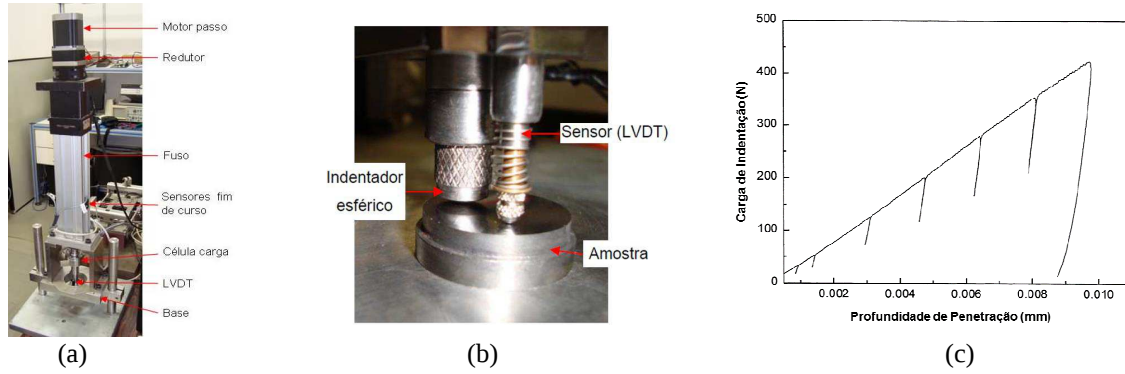


Figura 1. (a) Detalhe do equipamento de indentação instrumentada; (b) posicionamento do penetrador e do LVDT sobre a amostra (Ferreira, 2010) e (c) curva de “carga versus profundidade de penetração” (Mathew *et al.*, 1999).

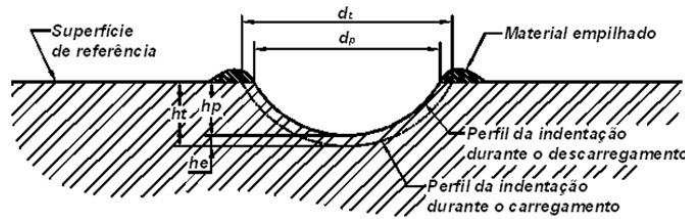


Figura 2. Impressão típica de um ciclo de carregamento e descarregamento de indentação (Callegari *et al.*, 2005).

Tabor (1951) estabeleceu uma relação entre a deformação plástica verdadeira (ϵ_v) em um teste de tração uniaxial e a deformação de indentação (d_p/D) para penetradores esféricos. Assim, a deformação (ϵ_v) e a tensão verdadeiras (σ_v) podem ser calculadas a partir das equações (1) e (2), respectivamente.

$$\epsilon_v = 0,2 \cdot \frac{d_p}{D} \quad (1)$$

$$\sigma_v = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d_p^2 \cdot \delta} \quad (2)$$

Onde: d_p é o diâmetro plástico da impressão; D é o diâmetro do penetrador esférico; F é a carga normal de indentação e δ é um parâmetro que depende da compliância do equipamento e da tensão de indentação (Eq. (4)).

O diâmetro plástico da impressão (d_p) é calculado usando a Eq. (3).

$$d_p = \left(2,735 \cdot F \cdot D \cdot \left(\frac{1}{E_a} + \frac{1}{E_i} \right) \cdot \left(\frac{h_p^2 + 0,25 \cdot d_p^2}{h_p^2 + 0,25 \cdot d_p^2 - h_p \cdot D} \right) \right)^{1/3} \quad (3)$$

Onde: E_a é o módulo de elasticidade do material ensaiado e E_i é o módulo de elasticidade do material do penetrador, normalmente WC-Co.

A Eq.(3) evidencia que é necessário o conhecimento prévio do tipo de material a ser ensaiado, uma vez que o módulo de elasticidade é um dos parâmetros de entrada. Normalmente isto não é um problema na realização de testes *in situ* em dutos, pois os mesmos são, na maior parte dos casos, fabricados com aços-carbono ou aços baixa liga e, portanto, pode-se adotar $E_a = 210$ GPa.

O parâmetro δ é determinado através do conjunto de equações (4, 5, 6 e 7) a seguir.

$$\delta = \begin{cases} 1,12 & \phi \leq 1 \\ 1,12 + \tau \cdot \ln \phi & 1 \leq \phi \leq 27 \\ \delta_{m\acute{a}x} & \phi > 27 \end{cases} \quad (4)$$

$$\phi = \frac{\epsilon_v \cdot E_a}{0,43 \cdot \sigma_v} \quad (5)$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = 2,87 \cdot \alpha_m \quad (6)$$

$$\tau = \frac{\delta_{m\acute{a}x} - 1,12}{\ln(27)} \quad (7)$$

Onde: α_m é um fator que depende da sensibilidade à taxa de deformação do material ensaiado (Haggag *et al.*, 1989).

Para os aços, a fração de escoamento plástico da curva de tensão verdadeira (σ_v) versus deformação plástica verdadeira (ϵ_v) pode ser expressa por meio de uma função potência (equação de Hollomon), conforme a Eq. (8).

$$\sigma_v = K \cdot \epsilon_v^n \quad (8)$$

Onde: K é o coeficiente de resistência e n o coeficiente de encruamento do material.

Através de regressão linear, os dados resultantes das equações (1) e (2) são ajustados à Eq. (8), de forma a se determinar o coeficiente de resistência e o coeficiente de encruamento do material. A solução das equações (1) a (8) é realizada através de métodos numéricos, pois envolve iteração.

O limite de resistência do material (σ_r) é calculado a partir da Eq. (9).

$$\sigma_r = K \cdot \left(\frac{n}{e} \right)^n \quad e \cong 2,7182 \quad (9)$$

Como a profundidade total (h_t) é medida para cada ciclo do ensaio, o diâmetro total (d_t) pode ser calculado através da relação de área projetada do penetrador esférico (Eq. (10)). Os pontos de todos os ciclos de carregamento são ajustados por uma regressão linear através da Eq. (11).

$$d_t = 2 \cdot \sqrt{h_t \cdot D - h_t^2} \quad (10) \quad \frac{F}{d_t^2} = A \cdot \left(\frac{d_t}{D} \right)^{m-2} \quad (11)$$

Onde: m é o coeficiente de Meyer e A é um parâmetro de teste do material.

Os valores de A e m são obtidos a partir da regressão dos dados de d_t/D versus F/d_t^2 . O parâmetro de teste do material (A) é usado para calcular o limite de escoamento (σ_e) através da Eq. (12).

$$\sigma_e = \beta_m \cdot A \quad (12)$$

Onde: β_m é uma constante do tipo de material (Haggag *et al.*, 1989).

A dureza Brinell (HBW) do material ensaiado também pode ser determinada a partir da curva “carga versus profundidade de penetração” do ensaio de Macroindentação Instrumentada. O cálculo é feito considerando a carga máxima do ensaio ($F_{máx}$ em kgf), o diâmetro final da impressão (d_f em mm) e o diâmetro do penetrador (D em mm), usando a Eq. (13), conforme ensaio de dureza Brinell padronizado pela norma ASTM E10-12.

$$HBW = \frac{2 \cdot F_{máx}}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d_f^2})} \quad (13)$$

Além do modelo apresentado, proposto por Haggag *et al.* (1989), Known e Ahn (2001) propuseram um método para cálculo das propriedades mecânicas via Macroindentação Instrumentada que considera a mudança da área de contato do indentador através da deflexão elástica (*sink-in*) e o empilhamento plástico (*pile-up*). Kania e Russel (2003) compararam os dois modelos, através de ensaios em diferentes aços, e concluíram que ambos apresentam bons resultados (reprodutibilidade e exatidão), tendo como referência as propriedades determinadas por ensaios de tração.

Ramos Neto *et al.* (2004), utilizando um equipamento portátil desenvolvido numa parceria entre a Petrobras, FINEP e a Universidade Federal de Uberlândia (Fig. 1 - a), comparou os resultados obtidos em ensaios de Macroindentação Instrumentada, adotando o modelo proposto por Haggag, com aqueles determinados a partir de ensaios de tração, para um aço API-X60. Obteve-se excelente correlação entre os ensaios, cujas diferenças nos valores não ultrapassaram 5%.

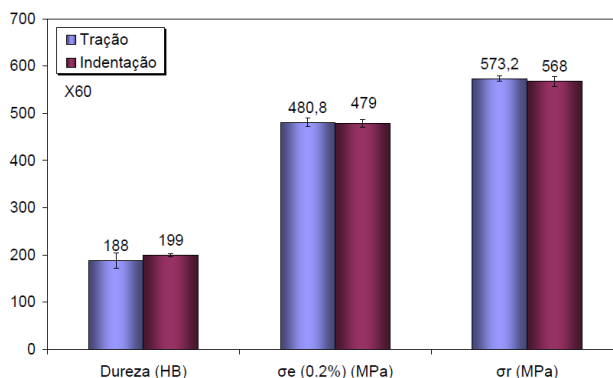


Figura 3. Comparação dos resultados de Macroindentação Instrumentada com os ensaios de tração para um aço API-X60 (Ramos Neto *et al.*, 2004).

Callegari *et al.* (2005), utilizando o mesmo equipamento de macroindentação portátil, realizou ensaios em amostras de um duto fabricado com aço API-X46 e mostrou que o acabamento superficial não influencia de forma significativa os valores das propriedades mecânicas medidas. Desta forma, a preparação da superfície de teste pode ser realizada em uma única etapa, utilizando lixa de granulometria 60 mesh. Isso representa um grande atrativo para uso da macroindentação no levantamento de propriedades *in situ*, já que a preparação da superfície do duto é muito simples.

3. MELHORIAS E NOVAS APLICAÇÕES DOS ENSAIOS DE MACROINDENTAÇÃO INSTRUMENTADA

A Macroindentação Instrumentada tem sido usada na avaliação e monitoramento de propriedades mecânicas de ligas que sofrem envelhecimento, como em superligas de níquel (Mathew *et al.*, 1999), assim como na determinação de gradientes de propriedades em soldas, através do uso de indentadores de pequenos diâmetros (Murty *et al.*, 1999).

Alguns trabalhos publicados nos últimos 15 anos (Murty *et al.*, 1999; Byun *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2006) indicam a possibilidade promissora de uso da técnica de Macroindentação Instrumentada para estimar o comportamento à fratura de materiais através de ensaios *in situ*, em substituição a ensaios como o CTOD e o Charpy, que são destrutivos e requerem a usinagem e preparação complexa de corpos de prova. Estes trabalhos exploram o conceito de Energia de Indentação para Fratura (*Indentation Energy to Fracture – IEF*), que relaciona a energia de deformação na indentação com a energia de fratura, com o objetivo de estimar a tenacidade à fratura através de ensaios de macroindentação usando penetradores esféricos. Em trabalho recente, Haggag (2009) utilizou ensaios de Macroindentação Instrumentada para avaliar, através da determinação da tenacidade à fratura do material, o fenômeno de fragilização pelo hidrogênio em aços ferríticos usados na fabricação de dutos para condução de petróleo.

Neste sentido, as atuais linhas de pesquisa relacionadas à Macroindentação Instrumentada envolvem: otimização dos parâmetros de ensaio que dependem do tipo de material (α_m e β_m , no modelo de Haggag); determinação da influência da carga de ensaio e diâmetro do penetrador nos resultados; melhoria dos modelos para cálculo das propriedades de fratura, principalmente tenacidade à fratura e relação com ensaios Charpy; uso da macroindentação para monitoramento de estruturas que podem sofrer fragilização pelo hidrogênio ou envelhecimento; e desenvolvimento e validação de modelos em elementos finitos visando identificar e avaliar a influência de diversos parâmetros de ensaio nos resultados.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Petrobras e à FINEP o apoio financeiro ao projeto.

5. REFERÊNCIAS

- Byun, T.S., Kim, S.H., Lee, B.S., Kim, I.S., Hong, J.H., 2000, “Estimation of Fracture Toughness Transition Curves of RPV Steels from Ball Indentation and Tensile Test Data”, *Journal of Nuclear Materials* 277, 263-273.
- Callegari, V.A., Ferreira, F.M., Ramos Neto, F.F., Filho, B.G.S., Paes, M.T.P., Franco, S.D., 2005, “Influência da Topografia Superficial nas Propriedades Mecânicas Medidas Através de Ensaios de Macroindentação Instrumentada”, *Anais do 15º POSMEC/UFU, Uberlândia*.
- Ferreira, F.M., “Avaliação Tribomecânica via Esclerometria Retilínea e Indentação Instrumentada do Aço ABNT 8550”, *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia*, 2010.
- Haggag, F.M., 2009, “In-Situ Monitoring of Hydrogen Embrittlement in Ferritic Steel Pipelines”, *International Conference on Fracture, ICF12, Ottawa*.
- Haggag, F.M., Nanstad, R.K., Braski, D.N., 1989, “Structural Integrity Evaluation Based on an Innovative Field Indentation Macroprobe”, *ASME Vol.170, Book No.H00485*, pp.101-107.
- Kania, R., Russell, A., Gao, M., 2003, “Advanced Indentation Systems for Tensile Properties Evaluation of In-Service Pipelines”, *Congresso internacional de ductos, Puebla*.
- Kwon, D., Ahn, J.H., 2001, “Derivation of Plastic Stress – Strain Relationship From Ball Indentations: Examination of Strain Definition and Pileup Effect”, *Mat. Res. Vol 16, No. 11*.
- Lee, J.S., Jang, J., Lee, B.W., Choi, Y., Lee, S.G., Kwon, D., 2006, “An Instrumented Indentation Technique for Estimating Fracture of Ductile Materials: A Critical Indentation Energy Model Based on Continuum Damage Mechanics”, *Acta Materialia* 54, 1101-1109.
- Mathew, M.D., Murty, K.L., Rao, K.B.S., Mannan., 1999, “Ball Indentation Studies on the Effect of Aging on Mechanical Behavior of Alloy 625”, *Materials Science and Engineering A264*, 159-166.
- Murty, K.L., Miraglia, P.Q., Mathew, M.D., Shah, V.N., Haggag, F.M., 1999, “Characterization of Gradients in Mechanical Properties of SA-533B Steel Welds Using Ball Indentation”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 76.
- Ramos Neto, F.F., Filho, B.G.S., Paes, M.T.P., Franco, S.D., 2004, “Gradientes de Propriedades Mecânicas em Estruturas de Condução de Petróleo”, *Anais do 14º POSMEC/UFU, Uberlândia*.
- Tabor D., 1951, *The Hardness of Metals*, Oxford University Press, New York.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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