

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS ANALÍTICOS PARA OBTENÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS *IN SITU* ATRAVÉS DA MACROINDENTAÇÃO INSTRUMENTADA

Andréa Fabíola Ricardi Bertão

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Laboratório de Tribologia e Materiais, Campus Santa Mônica, Uberlândia – MG.

afrbertao@mecanica.ufu.br

Henry Fong Hwang

ltm-hfhwang@mecanica.ufu.br

Sinésio D. Franco

ltm-sdfranco@ufu.br

Marcelo T. Piza Paes

Petrobras, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello, Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ.

mtp@cenpes.petrobras.com.br

Resumo: *Ensaio de macroindentação instrumentada para medição de propriedades mecânicas de materiais, tais como limite de escoamento e limite de resistência à tração, são de importante aplicação na indústria, particularmente na operação de dutos de extração de gás e petróleo, onde suas propriedades podem ser desconhecidas e de difícil avaliação. A utilização de equipamentos portáteis baseados no ensaio de macroindentação instrumentada (com monitoração contínua da carga e da profundidade de indentação) oferece a possibilidade de obtenção destas propriedades com precisão e rapidez, sem a necessidade de remoção de amostras. Para tal, é realizada uma impressão com o uso de um indentador esférico, caracterizando-o como um ensaio não destrutivo. Este trabalho tem por objetivo comparar dois métodos analíticos utilizados para obtenção de propriedades mecânicas dos materiais através da macroindentação instrumentada. A diferença entre os métodos está na inclusão dos efeitos de deformação elástica e empilhamento plástico (causados durante a indentação) nos cálculos destas propriedades. Para a comparação foram feitas indentações em amostras dos aços ABNT 1010, API 5L X-46 e API 5L Gr B. O primeiro método mostrou-se mais eficaz, obtendo melhor aproximação das curvas de tensão versus deformação geradas em testes de tração.*

Palavras-chave: *Ensaio não-destrutivo, macroindentação instrumentada, propriedades mecânicas, métodos analíticos.*

1. INTRODUÇÃO

Os dutos e tubulações que fazem condução de petróleo e gases da indústria petrolífera muitas vezes possuem suas constituições e propriedades mecânicas desconhecidas por motivos diversos, o que dificulta a avaliação da integridade estrutural dos equipamentos em operação. Para a determinação dos defeitos e danos mecânicos é necessário a determinação das propriedades de tração e de tenacidade à fratura, e das tensões atuantes nos materiais em questão.

Usualmente são feitos testes de tração em amostras dos dutos. No entanto, são ensaios destrutivos e necessitam da remoção de material, o que acarreta na paralisação da produção e em perdas financeiras para a indústria. Como uma alternativa não destrutiva para a determinação de

propriedades mecânicas em campo, existem os ensaios de macroindentação instrumentada, onde a zona ensaiada do material é uma pequena região de impressão.

Este trabalho propõe-se à comparação entre dois métodos analíticos de cálculo das propriedades mecânicas (Haggag et al, 1989 e Jang et al, 2005), utilizados na macroindentação instrumentada para encontrar o método em que os resultados mais se aproximem das propriedades reais dos materiais.

2. REVISÃO TEÓRICA DO PROCESSO DE MACROINDENTAÇÃO INSTRUMENTADA

Os ensaios são baseados na indentação instrumentada em uma superfície com múltiplos ciclos de carregamento e descarregamento em um mesmo ponto. As cargas e as respectivas profundidades de penetração são medidas durante o teste. Estes dados são usados para calcular os valores incrementais de tensão e deformação a partir da combinação de teorias de elasticidade e plasticidade e relações semi-empíricas que governam o comportamento do material sob carregamentos multiaxiais de indentação (Tabor, 1951).

A diferença entre os métodos analíticos comparados neste trabalho está na consideração dos fenômenos plásticos pelo método B, o que não ocorre no método A. No método B são levados em consideração a mudança da área de contato do indentador através da deformação elástica e do empilhamento plástico.

2.1. Método A

As correlações de dureza e deformação para testes de tração uniaxial onde são usados penetradores esféricos, são baseadas em três tópicos que se aplicam bem para diversos materiais (Tabor, 1951):

1. As curvas monotônicas de tensão *versus* deformação geradas de ensaios de tração e compressão são semelhantes, desde que não haja mudança na área transversal do corpo de prova;
2. A deformação da indentação correlaciona-se com a deformação plástica verdadeira em um teste de tração uniaxial;
3. A pressão média da indentação esférica correlaciona-se com a tensão de escoamento no teste uniaxial de tração (Haggag, 1993).

O diâmetro plástico (d_p) é determinado a partir da profundidade de indentação (h_p) quando não há muito acúmulo de material ou deslocamento ao redor das fronteiras da indentação (Mok, 1996), Figura 1 (a).

Os ensaios de macroindentação instrumentada não apresentam distinção entre a fase linear elástica e a fase não linear com encruamento do material. Devido a este fato, as curvas da carga pela profundidade podem ser aproximadas por polinômios de primeiro grau, como visto na Figura 1 (b). Desta forma, determinam-se os valores da força máxima ($F_{máx}$) e das profundidades plástica (h_p), elástica (h_e) e máxima ($h_{máx}$) para cada ciclo.

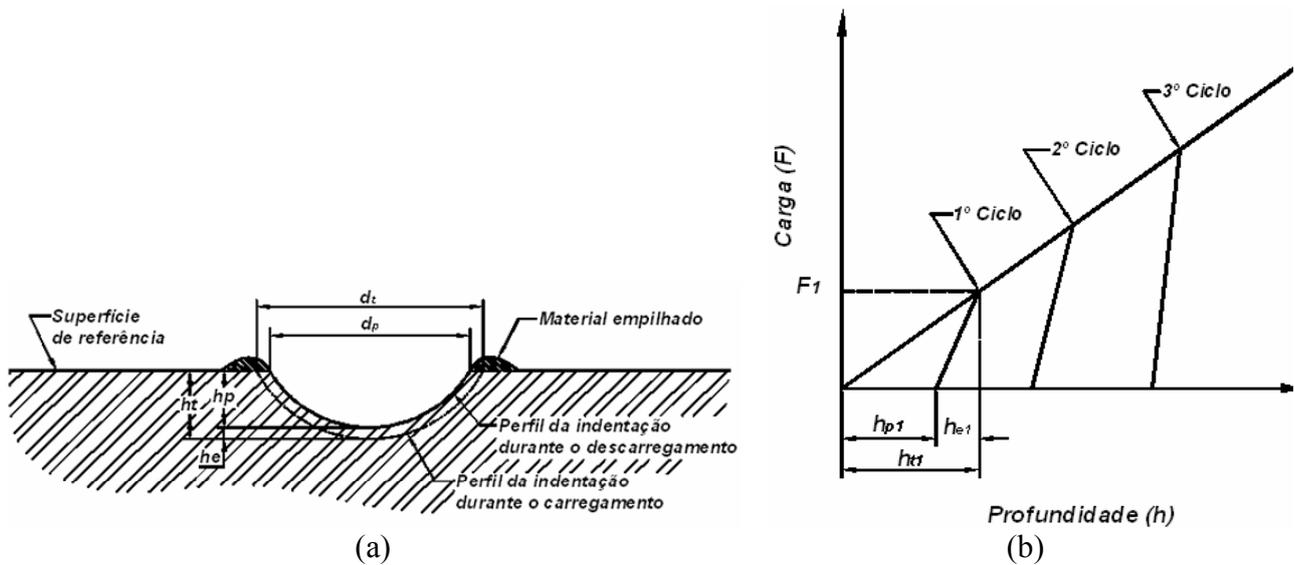


Figura 1: Ensaio de macroindentação instrumentada com a utilização de penetradores esféricos: (a) perfil típico do ciclo de carregamento e de descarregamento; (b) representação esquemática da relação entre a carga e a profundidade.

A deformação e a tensão verdadeiras de um teste de tração uniaxial podem ser estabelecidas a partir das Equações 1 e 2, respectivamente, e a solução pode ser dada por meios computacionais.

A partir da equação de Hertz pode-se fazer a análise da deformação que se dá no começo dos ensaios (Haggag et al, 1989 e Timoshenko, 1970). A profundidade plástica (h_p) pode ser estimada através do descarregamento da amostra, e usando a Equação 3, tem-se o diâmetro plástico da indentação (d_p).

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

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

Sendo: (d_p/D) - Deformação de indentação; F - carga de indentação; D - diâmetro da esfera; d_p - diâmetro plástico; ε_v - deformação plástica verdadeira; σ_v - tensão verdadeira; δ - parâmetro que depende da compliância do equipamento e da tensão de indentação.

O cálculo do diâmetro plástico é dado pela expressão abaixo:

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

Sendo: E_a - módulo de elasticidade do material da amostra; E_i - módulo de elasticidade do material do penetrador; D - diâmetro da esfera; h_p - profundidade plástica da impressão.

Cálculo de δ :

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

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

$$\delta_{máx} = 2,87 \cdot \alpha_m \quad (6)$$

$$\tau = \frac{\delta_{máx} - 1,12}{\ln(27)} \quad (7)$$

Sendo: α_m - fator de restrição que depende da sensibilidade à taxa de deformação do material de teste (Haggag et all, 1989).

A tensão verdadeira (σ_v) em função da deformação plástica verdadeira (ε_v) pode ser representada por uma função de potência conhecida, dada pela Equação 8.

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

Sendo: K - coeficiente de resistência; n - coeficiente de encruamento.

O limite de ruptura (σ_r - de engenharia) é calculado a partir da Equação 9.

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

Sendo: e - número de Euler = 2,7182.

A profundidade total da indentação (h_t) é medida nos ensaios, enquanto a carga é aplicada e, com este valor, é calculado o diâmetro total (d_t).

Os pontos de todos os ciclos de carregamento até que se atinja $d_t/D=1,0$ são ajustados por uma regressão linear, de acordo com a Equação 10:

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

Sendo: F - carga aplicada; m - coeficiente de Meyer; A - parâmetro de teste do material.

Os valores de A e m , que podem ser obtidos das equações acima, são usados para calcular o limite de escoamento (σ_e) do material através da Equação 11.

$$\sigma_e = \beta_m \cdot A \quad (11)$$

Sendo: β_m - constante do tipo de material (Haggag et all, 1989).

2.2. Método B

O objetivo deste método é tentar aproximar o modelo matemático aos fenômenos ocorridos na indentação, considerando a mudança da área de contato do indentador através da deformação elástica (*sink-in*) e o empilhamento plástico (*pileup*). Estes fenômenos são ilustrados na Figura 2.

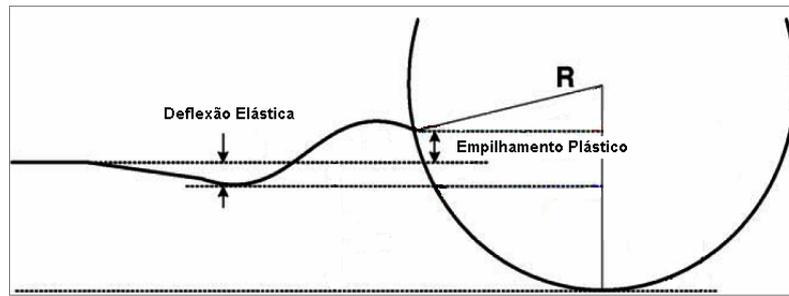


Figura 2: Fenômenos elástico e plástico na indentação.

A área de contato entre o indutor e o material é determinada a partir da curva de carregamento *versus* profundidade de indentação, considerando os fenômenos de deflexão elástica e empilhamento plástico. A tensão e deformação representativas ao material são definidas em termos dos parâmetros de contato obtidos na indentação, como profundidade do contato (h_c) e raio de contato (a), ilustrados na Figura 3(a).

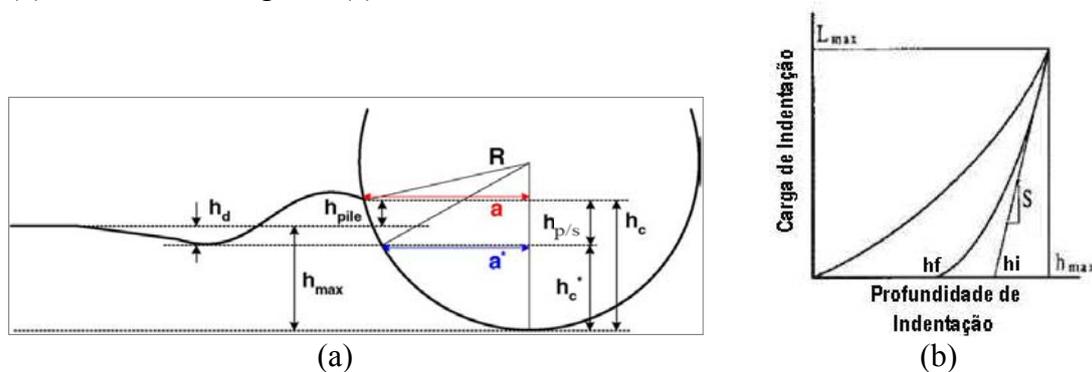


Figura 3: (a) Variáveis utilizadas para o cálculo da área de contato; (b) Curva de carregamento *versus* profundidade.

A profundidade de contato (h_c) entre o indutor e o material num dado carregamento é obtida através do cálculo da deflexão elástica a partir da curva de descarregamento (Oliver and Pharr, 1992 e Doerner and Nix, 1986).

Na curva de carga *versus* profundidade observada na Figura 3 (b) o declive inicial representa a rigidez do material.

Se não houver mudanças na área de contato durante o descarregamento, h_d será $h_{max} - h_i$ (Doerner and Nix, 1986). Considerando a geometria do indutor, tem-se a seguinte relação (Sneddon, 1965):

$$h_d = \omega (h_{max} - h_i) \quad (12)$$

Sendo: h_{max} - profundidade máxima de indentação; ω - constante que depende da geometria do indutor; h_d - a profundidade da deflexão elástica; h_i - profundidade obtida da extrapolação tangente até a linha de carga nula.

O comportamento da deflexão e do empilhamento ao redor da indentação altera com a área de contato (Taljat et al, 1998; Matthews, 1980 e Hill et al, 1989). Se houver empilhamento, a área de contato será maior do que a esperada, e se houver deflexão, a área de contato será menor.

A razão entre empilhamento/deflexão é determinada por uma constante adimensional c para metais com baixo limite de escoamento, baseada na teoria de elasticidade não linear. Ela mostra que o fator de influência dominante na forma e no tamanho da zona plástica durante a indentação dos metais está relacionado com as características de encruamento (Hill et al, 1989).

Se a zona plástica abaixo do penetrador for grande para um expoente de encruamento (n) pequeno, a zona elástica ao redor não consegue acomodar a mudança de volume causada pela

penetração do indentedor, então ocorre o empilhamento. A Equação 13 pode ser estabelecida para a determinação da área real de contato entre o indentedor e a amostra através da curva carga *versus* profundidade:

$$a^2 = \frac{5(2-n)}{2(4+n)} (2Rh_c^* - h_c^{*2}) \quad (13)$$

Sendo: R -raio do indentedor.

A deformação (ε_R) pode ser então definido considerando $r = a$ e multiplicando por uma constante α .

$$\varepsilon_R = \frac{\alpha}{\sqrt{1-(a/R)^2}} \frac{a}{R} = \alpha \cdot \text{tg} \gamma \quad (14)$$

Sendo: $\text{tg} \gamma$ - deformação de cisalhamento na borda de contato; a - constante que independe do material determinada empiricamente para trazer uma correlação entre ε_R e σ_R .

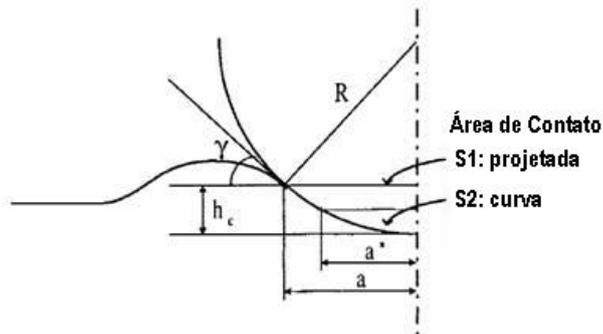


Figura 4: Representação esquemática do empilhamento plástico.

A tensão σ_R pode ser obtida através da pressão de contato P_m . No regime elástico, o valor da razão P_m/σ_R aumenta linearmente até aproximadamente 1,1. Ele aumenta gradualmente no regime elástico-plástico e é quase constante no regime totalmente plástico (Tabor, 1951 e Francis, 1976).

$$P_m / \sigma_R = \psi \quad (15)$$

Onde ψ é uma constante de deformação plástica.

É esperado que esta razão traga alguma relação com a expansão da zona plástica: por exemplo, os valores de deformação de escoamento e expoente de encruamento. O máximo valor de ψ é aproximadamente 3 para a deformação totalmente plástica (Johnson, 1985).

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A macroindentação instrumentada foi realizada com um equipamento portátil, desenvolvido em parceria entre a Universidade Federal de Uberlândia e a Petrobras (Paes et al, 2004).

Foram feitos ensaios de macroindentação em amostras dos aços ABNT 1010, API5L X-46 e API5L-Gr.B, e as curvas de tração foram obtidas em ensaios realizados seguindo a norma API 5L.

A amostra retirada da seção transversal de uma barra cilíndrica de aço ABNT 1010 foi lixada (lixa 60 mesh) e retificada, e possui diâmetro de aproximadamente 0,01 m e altura de 0,005 m. Para os aços API5L X-49 e API5L-Gr.B foram feitos os ensaios diretamente na superfície lixada (lixa 60 mesh) dos dutos.

Foram realizadas cinco indentações em cada amostra para obter uma maior confiabilidade dos resultados das propriedades mecânicas. Os parâmetros de teste utilizados nos ensaios de indentação foram: 10 ciclos de descarregamento, carga máxima de 2000 N, descarregamento de 30% e diâmetro da esfera do penetrador de 0,0015 mm.

Os módulos de elasticidade do indentador e do material são previamente conhecidos. A profundidade de indentação (h_{max}) é medida por um sensor de medição de deslocamento linear (LVDT) indutivo e a carga de indentação (F) por uma célula de carga.

Os pontos obtidos nos ensaios foram usados para o cálculo das propriedades, ajustando-se a curva tensão *versus* deformação usando $\alpha_m = 1,2000$ e $\beta_m = 0,2285$ para todos os materiais, no método A. E as constantes utilizadas para o método B se encontram na tabela 1.

Tabela 1: Constantes utilizadas no Método B

Material	α	ψ
ABNT 1010	0,11	3,47
API5L-46	0,16	3,6
API5L-Gr.B	0,15	3,37

As constantes utilizadas foram obtidas em uma otimização feita para que as curvas de cada método se ajustassem melhor às curvas dos ensaios de tração. A otimização foi feita através do método iterativo do mínimo erro quadrático.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o aço ABNT 1010, o cálculo das propriedades se aproximou mais dos resultados de tração quando realizado através do método A. Os desvios gerados foram de aproximadamente 5% do limite de escoamento real e de 18,2% do limite de resistência real. Como ambos os resultados ficaram abaixo das propriedades reais, isso traz segurança ao projeto, visto que a partir destes resultados são definidos parâmetros de aplicação no campo.

O gráfico da Figura 5 mostra as curvas de tração e as obtidas pelos métodos A e B. As curvas para cada método representadas abaixo são uma média das curvas obtidas com o resultados dos 5 ensaios de indentação. Pode-se observar que a curva do método A aproxima-se melhor da curva do ensaio de tração, definindo também um ponto próximo ao limite de escoamento. A curva gerada pelo método B se distancia mais, principalmente do limite de escoamento.

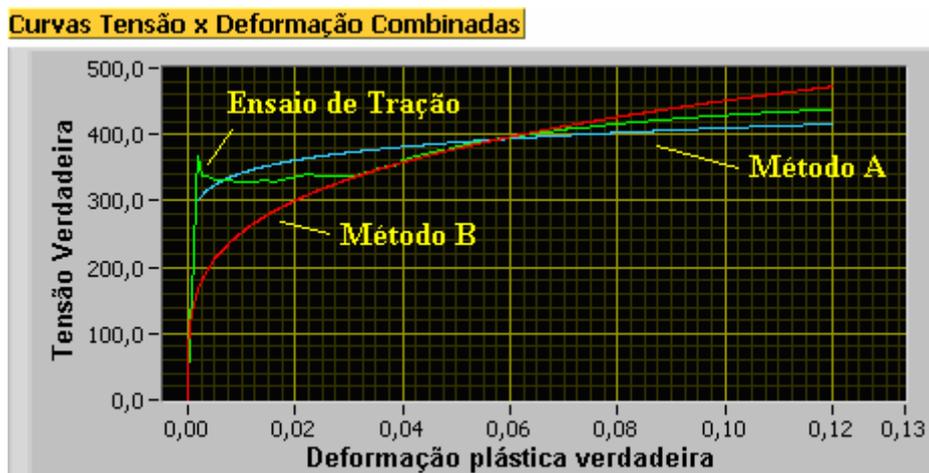


Figura 5: Curvas tensão versus deformação dos ensaios de tração, métodos A e B combinadas para o aço ABNT 1010.

Os melhores resultados obtidos através do método A foram para a o aço API 5L X46, onde foi encontrado um desvio de 3,7% para a análise do limite de escoamento. Já na análise do limite de resistência considera-se não haver erros (desvio de 0,19%). Para a mesma amostra, o método B apresenta 22% de erro para o limite de escoamento e 13% no limite de resistência, consideravelmente maiores que os erros obtidos no método anterior.

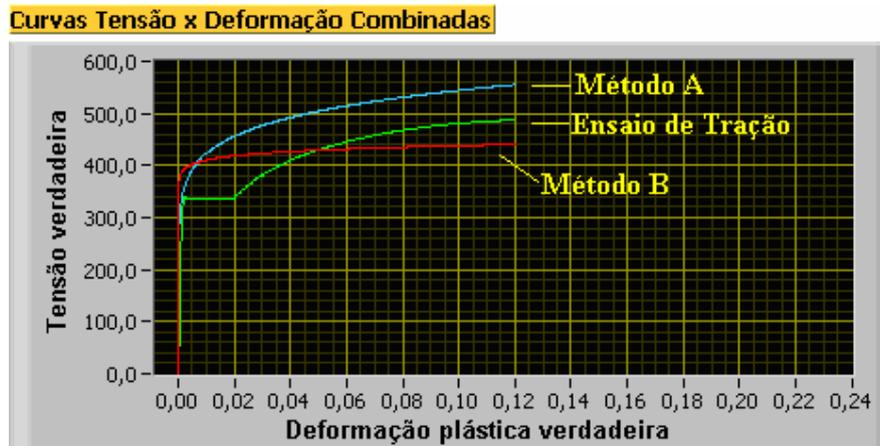


Figura 6: Curvas tensão *versus* deformação dos ensaios de tração, métodos A e B combinadas para o aço API 5L X46.

A amostra do aço API 5L Gr foi a única para a qual o método B obteve melhores resultados, onde os erros foram de 1,7% e 6,5% para os limites de escoamento e resistência, respectivamente. Entretanto, o método A também apresentou desvios pequenos: 5% para o limite de escoamento e 6% para o limite de resistência. Para este material, as curvas de ambos os métodos se ajustaram bem à curva de tração, refletindo bons resultados no cálculo das propriedades mecânicas.

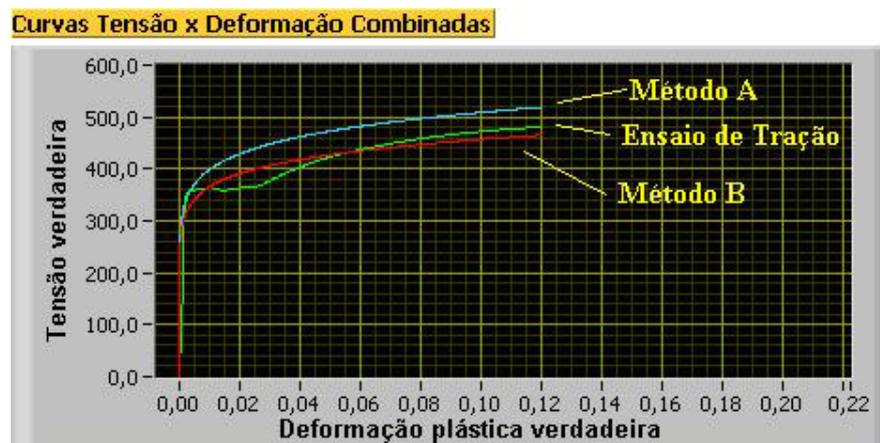


Figura 7: Curvas tensão *versus* deformação dos ensaios de tração, métodos A e B combinadas para o aço API 5L Gr. B.

Para a maioria dos materiais ensaiados, o método A gerou melhores resultados que o B, mostrando maior proximidade das propriedades obtidas nos ensaios de tração. As Tabelas 2 e 3 mostram os resultados.

Tabela 2: Propriedades mecânicas reais, obtidas em ensaio de tração

Material	σ_e (Pa)	σ_r (Pa)
ABNT 1010	335000000	451000000
API5L X-46	336000000	490000000
API5L- Gr.B	359000000	487000000

Tabela 3: Propriedades e erros percentuais dos métodos A e B em relação aos valores de tração.

Material	Média das propriedades (em Pa) e Erro médio (Módulo) para cada método							
	Método A				Método B			
	σ_e obtido	Desvio (σ_e)	σ_r obtido	Desvio (σ_r)	σ_e obtido	Desvio (σ_e)	σ_r obtido	Desvio (σ_r)
ABNT 1010	318000000	4,98%	369000000	18,16%	254000000	24,28%	579000000	28,34%
API5L X-46	348000000	3,66%	491000000	0,19%	411000000	22,43%	424000000	13,55%
API5L-Gr.B	341000000	5,16%	458000000	6,08%	365000000	1,70%	456000000	6,49%

Onde σ_e e σ_r são os limites de escoamento e de resistência, respectivamente.

5. CONCLUSÕES

Pode-se concluir através da análise dos desvios gerados, que o método A é mais eficaz para o cálculo de propriedades mecânicas. Na maior parte dos casos, o método B apresentou erros significativamente maiores que os gerados pelo método A.

Os aços ABNT 1010 e API5L X-46 tiveram desempenhos melhores com o método A. Para este primeiro aço, o limite de escoamento calculado por este método gerou um desvio menor que o obtido pelo método B, enquanto no cálculo do limite de resistência ambos apresentaram erros elevados. Já para o API5L X-46 o primeiro método originou desvios bem menores que o método B, para os dois limites.

Para o caso da amostra do aço API 5L Gr. B, pode-se considerar que os dois métodos tiveram resultados satisfatórios, visto que apesar do método B apresentar erros menores, o método A também apresentou pequenos desvios.

Como nos ensaios em campo as propriedades mecânicas ou a curva de tração dos materiais não são previamente conhecidas, recomenda-se a utilização do método A, pois seus desvios em média foram menores, obtendo-se curvas mais próximas das reais.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Petrobras pelo apoio financeiro dado ao projeto.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Doerner, M.F. and Nix, W.D., 1986, J. Mater. Res. 1, 601.
- Francis, H.A., 1976, Trans. ASME (Series H) 9, 272.
- Haggag, F.M., in: W.R. Corvin, F.M. Haggag, W.L. Server (eds), 1993, "Small Specimen Test Technique Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal Annealing and Plant Life Extension", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p. 27 ASTM STP 1204.
- 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.
- Hill, R., Storakers, B. and Zdunek, A.B., 1989, Proc. R. Soc. London, Ser. A 423, 301.
- Johnson, K.L., 1985, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

- Jang, J-I., Choi, Y., Lee, J.S., Lee, Y.H., Kwon, D., Gao, M. and Kania, R., 2005, “Application of instrumented indentation technique for enhanced fitness-for-service assessment of pipeline crack”
- Johnson, K.L., 1985, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Mattews, 1980, J.R., *Acta Metall.* 28, 311.
- Mok, C.H., 1996, *Exp. Mech.* 6 - 87.
- Oliver, W.C. and Pharr, G.M., 1992, *J. Mater. Res.* 7, 1564.
- Paes, M.T.P. *et al.*, 2004, “Avaliação de Propriedades Mecânicas In Situ Através de Macroindentação Instrumentada”, RT PETROBRAS/CENPES/TMEC N° 09/04.
- Sneddon, I.N., 1965, *Int. J. Eng. Sci.* 3, 47.
- Tabor, D., 1951, “The Hardness of Metals”, Oxford University Press, New York.
- Taljat, B., Zacharia, T., and Kosel, F., 1998, *Int. J. Solids Structures* 35, 4411.
- Timoshenko, S.P., Goodier, J.N., 1970, “Theory of Elasticity”, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, N Y, pp. 409-414.

EVALUATION OF ANALYTICAL METHODS FOR ATTAINMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS *IN SITU* THROUGH INSTRUMENTED MACROINDENTATION

Andréa Fabíola Ricardi Bertão

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Laboratório de Tribologia e Materiais, Campus Santa Mônica, Uberlândia – MG.
afbertao@mecanica.ufu.br

Henry Fong Hwang

ltm-hfhwang@mecanica.ufu.br

Sinésio D. Franco

ltm-sdfranco@ufu.br

Marcelo T. Piza Paes

Petrobras, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello, Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ.
mtp@cenpes.petrobras.com.br

Abstract: *The possibility of getting real information about mechanical properties of pipelines (yield strength, ultimate tensile strength, etc.) is of great importance. The use of instrumented indentation tests (with continuous recording of depth and load) carried through portable equipment, offers the possibility to access these properties with rapidity. In this non-destructive test it is not necessary to remove material from the pipe and only a small spherical impression is printed on the surface. This work compares two different methods used to calculate mechanical properties of materials with instrumented macroindentation tests. The major difference between them is the consideration of pileup and sink-in effects during indentation. The first method showed to be more effective, with better approximation of stress-strain curves generated on tensile tests.*

Keywords: *Non-destructive tests, instrumented macroindentation, mechanical properties, ball indentation tests, analytical methods.*