



14° POSMEC - Simpósio do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica



GRADIENTES DE PROPRIEDADES MECÂNICAS EM ESTRUTURAS DE CONDUÇÃO DE PETRÓLEO

Francisco F. Ramos Neto

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

Byron Gonçalves S. Filho

Petrobras, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello, Cidade Universitária, Rio de
Janeiro - RJ
byron@petrobras.com.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

Sinésio D. Franco

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Laboratório de Tribologia e Materiais,
Campus Santa Mônica, Uberlândia - MG
ltm-sdfranco@ufu.br

Resumo: *A possibilidade de se obter informações reais no que concerne a propriedades mecânicas de tubulações (limite de escoamento, limite de resistência de engenharia e curva tensão-deformação verdadeira) pode ser de grande utilidade para os operadores de dutos, principalmente em dutos mais antigos. 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 elevada precisão e rapidez, sem a necessidade de remoção de amostras do duto. Para tal, é realizada uma impressão (com o uso de um indentador esférico), cuja profundidade de penetração máxima é da ordem de 300 μm , sendo, portanto, um ensaio totalmente não destrutivo. Este trabalho tem como objetivo utilizar a técnica de macroindentação instrumentada para avaliação de gradientes de propriedades mecânicas em dutos de condução de petróleo. Os resultados realizados em aços API X60 e X42 mostram a alta potencialidade de utilização da técnica de macroindentação instrumentada na avaliação da existência de regiões com gradientes de propriedades mecânicas.*

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

1. INTRODUÇÃO

A Indústria Petrolífera possui em suas instalações dutos, tubulações e equipamentos cujas constituições (composição química e processo de fabricação) e, conseqüentemente suas propriedades mecânicas (limite de escoamento, resistência, tenacidade à fratura, etc.), não são devidamente conhecidas por razões diversas. Esse fato torna a tarefa de avaliação da integridade estrutural, no que se refere à presença de defeitos (corrosão, trincas, danos mecânicos, etc.), uma tarefa muito mais complexa e onerosa para a empresa. Isto porque, para se ter informações locais e reais de tais propriedades de uma área ou parte com defeito, por exemplo, em um duto, é necessária uma remoção de material do mesmo, o que antecipadamente determinará sua paralisação, risco de desabastecimento e, conseqüente, perdas com lucro cessante.

Para se determinar a integridade estrutural de peças e componentes de condução de petróleo faz-se necessário o conhecimento das propriedades de tração e de tenacidade à fratura dos materiais envolvidos, das dimensões dos eventuais defeitos, bem como das respectivas tensões atuantes (primárias e secundárias). Dessa forma, é possível estimar com segurança a vida útil remanescente de estruturas em operação. Essas propriedades podem ser obtidas através de ensaios destrutivos realizados em amostras retiradas da estrutura a ser analisada, ou ainda, através de ensaios *in situ* (não destrutivos). Neste último caso, os ensaios de indentação instrumentada (com monitoração da força em função da profundidade de indentação) apresentam-se como uma alternativa muito apropriada e precisa, principalmente para a obtenção de propriedades de tração.

Adicionalmente, ensaios de macroindentação apresentam a possibilidade de avaliação de propriedades mecânicas ao longo de seções de peças ou de regiões contendo soldas. Isso porque, via de regra, a zona perturbada do material durante o ensaio, consiste-se numa pequena região de uma impressão, cuja profundidade não ultrapassa 300 μm .

Neste sentido, este trabalho propõe-se à apresentação de resultados de macroindentação instrumentada realizados em amostras de dutos de condução de petróleo com vistas à investigação de propriedades mecânicas de microrregiões.

2. REVISÃO TEÓRICA

A avaliação de propriedades mecânicas via indentação instrumentada, tais como: limite de escoamento, de resistência à tração, dentre outros, tem sido realizada nos últimos anos através de modernos ensaios de macroindentação instrumentada no próprio duto, utilizando equipamentos portáteis, sem a necessidade de paralisar o processo, com a vantagem de ser não destrutivo (Haggag, 1993 e Mathew *et al.*, 1998). Estes ensaios são baseados na indentação controlada de uma superfície com múltiplos ciclos de carregamento e descarregamento em um mesmo ponto de ensaio. 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.

Historicamente, Tabor, (1951) foi quem primeiro relacionou a dureza e deformação próxima a penetradores esféricos com os testes de tração uniaxial. Estas correlações são baseadas em três premissas, quais sejam:

- 1 - curvas monotônicas de tensão versus deformação verdadeiras obtidas do ensaio de tração e compressão, são razoavelmente semelhantes;
- 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.

Estas premissas são bem estabelecidas para vários materiais (Haggag, 1993). Nota-se que para a primeira premissa, as curvas de tensão versus deformação (de engenharia) correlacionam-se somente até o limite de tração, desde que não haja mudança na área de seção transversal do corpo de prova.

Na técnica de macroindentação instrumentada, quando da utilização de penetradores esféricos, um carregamento seguido de subcarregamentos parciais permite que profundidade de indentação (h_p) associada com a deformação plástica seja corretamente estimada. O diâmetro plástico (d_p) pode ser determinado a partir de h_p se não há ocorrência pronunciada de material acumulado ou deslocado entorno da indentação (Mok, 1996 - Figura 1-b).

Nos múltiplos ciclos do ensaio de macroindentação instrumentada ocorrem processos consecutivos de encruamento, tanto do material anteriormente deformado, quanto do material novo. Consequentemente, a análise do limite de escoamento é realizada tomando-se ocorrências simultâneas de escoamento e encruamento do material sob condições de compressão multiaxial. Se, por um lado o volume de material deformado aumenta com o incremento da profundidade devido à geometria da esfera, por outro, o material sofre encruamento e dificulta este avanço. Por esta razão, os ensaios macroindentação instrumentada não apresentam duas fases; linear elástica seguida de uma não linear com encruamento do material. Portanto, os gráficos (Carga versus Profundidade) normalmente apresentam-se como porções que podem ser aproximadas por polinômios de primeiro grau (Figura 1-a). A partir destas curvas determinam-se os valores da força máxima ($F_{máx}$) e das profundidades plástica (h_p), elástica (h_e) e máxima ($h_{máx}$) de cada ciclo.

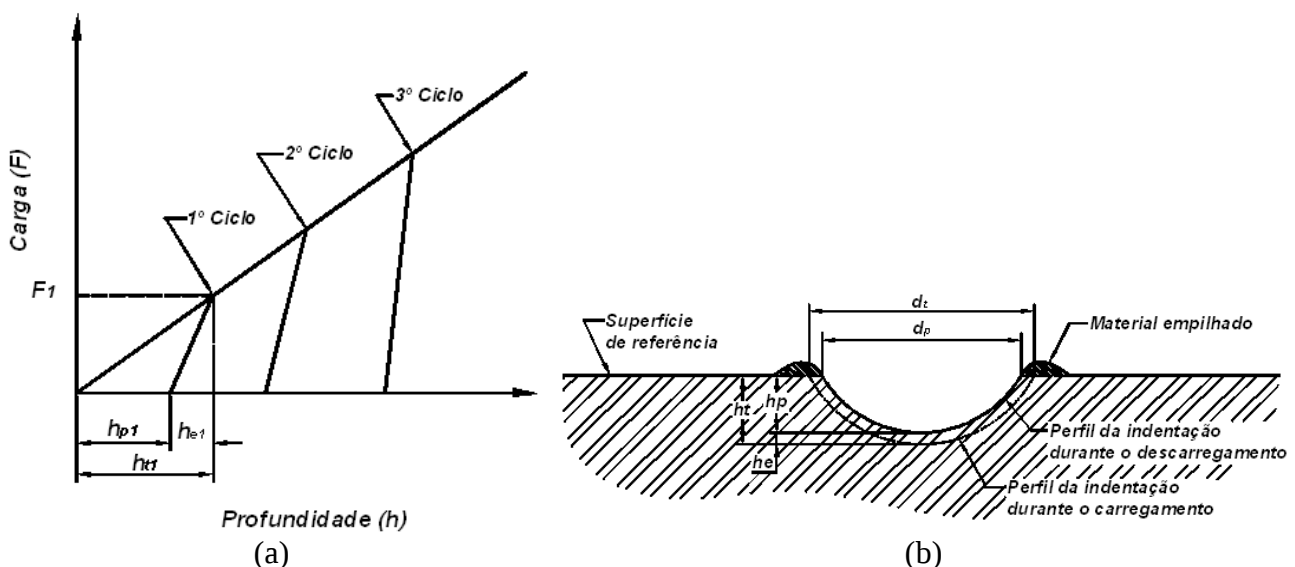


Figura 1 – Ensaio de macroindentação instrumentada com a utilização de penetradores esféricos: (a) representação esquemática da relação entre a carga e a profundidade e (b) perfil típico do ciclo de carregamento e de descarregamento

Tabor (1951) estabeleceu a relação entre a deformação plástica verdadeira (ε_v) em um teste de tração uniaxial e a deformação de indentação (d_p/D) a partir do ensaio de indentação eq (1). A tensão e a deformação verdadeiras podem ser resolvidas a partir das eq. (1) e (2), respectivamente. Todas essas equações são interdependentes o que sugere que a solução seja realizada de forma iterativa por meios computacionais.

A máxima deformação que pode ser medida através da IEI é 20%, quando $d_p=D$. Usando a equação de Hertz, (Haggag *et al.*, 1989), a profundidade plástica (h_p) pode ser estimada a partir do descarregamento da amostra e então convertido em diâmetro plástico da indentação (d_p) usando a eq. (3). A teoria de Hertz para contato normal elástico entre dois sólidos é usada na análise da deformação que ocorre no início do teste de indentação (Timoshenko, 1970).

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

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

Onde: F - carga de indentação; d_p - diâmetro plástico da impressão (eq.3); ε_v - deformação plástica verdadeira; σ_v - tensão verdadeira e δ - parâmetro que depende da compliância do equipamento e da tensão de indentação (eq. 4)

O cálculo de d_p é dado pela abaixo:

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

Onde: 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 :

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

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

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

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

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

A porção de escoamento plástico da curva de tensão verdadeira (σ_v) versus deformação plástica verdadeira (ε_v) pode ser representada por uma conhecida função de potência.

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

Onde: K - coeficiente de resistência; n - coeficiente de encruamento; σ_v - tensão verdadeira (eq. 1) e ε_v - deformação plástica verdadeira (eq. 2).

Os dados calculados das equações (1) e (2) são ajustados à eq. (8) através de uma regressão, onde se obtém os valores do coeficiente de encruamento (n) e do coeficiente de resistência (K). Logo o limite de ruptura (σ_r - de engenharia) é calculado a partir da eq. (9).

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

Onde: e - número de Euler = 2,7182.

Para cada ciclo do ensaio de indentação, a profundidade total (h_t) é medida enquanto a carga é aplicada e, usando a relação de área projetada do penetrador esférico, o diâmetro total (d_t) pode ser calculado (eq. 10):

$$d_t = 2 \cdot \sqrt{h_t \cdot D - h_t^2} \quad (10)$$

Os pontos de todos os ciclos de carregamento até $d_t/D=1,0$ são ajustados por uma regressão linear através da seguinte relação:

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

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

Os valores de A e m são obtidos apartir da regressão dos dados de d_t/D versus P/d_t^2 e o parâmetro de teste do material (A) pode então ser usado para calcular o limite de escoamento (σ_e) do material usando a seguinte relação:

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

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

A dureza Brinell (HB) também pode ser determinada apartir do ensaio de indentação instrumentada com penetrador esférico. O cálculo é feito usando a carga máxima ($F_{máx}$ em kgf), o diâmetro final da impressão (d_f em mm) e o diâmetro da esfera (D em mm) usando a seguinte equação (proveniente do ensaio de dureza Brinell padronizado - ASTM E 10-84):

$$HB = \frac{2 \cdot F_{máx}}{(\pi \cdot D \cdot (D - (D^2 - d_f^2)^{0,5}))} \quad (13)$$

Onde: $F_{máx}$ - Carga máxima [kgf]; D - diâmetro da esfera [mm] e d_f - diâmetro final da impressão [mm].

3. PROCEDIMENTOS

Os ensaios de indentação instrumentada foram realizados em um equipamento portátil desenvolvido numa parceria da Petrobras com a Universidade Federal de Uberlândia (Paes *et al.*, 2004). O equipamento possui como principais características: carga máxima de teste de 5 kN e resolução ± 1 N; deslocamento máximo de 25 mm e resolução no posicionamento de $\pm 0,1 \mu\text{m}$ (Figura 1-a e b). O peso do sistema é de cerca de 13 kgf e o funcionamento é totalmente automatizado através de microcomputador (Ramos Neto *et al.*, 2003).

Para a avaliação das propriedades mecânicas foram utilizados segmentos de dutos sem costura confeccionados em aço API-X60. Foram analisadas seções transversais destes dutos onde foram realizados os ensaios variando-se as posições de indentação em função do raio do duto (ver Figura 2-c). Para cada posição radial foram feitas três indentações de onde foram extraídos os valores médios das propriedades mecânicas. Os parâmetros de teste usados são mostrados na (b) Figura 3.

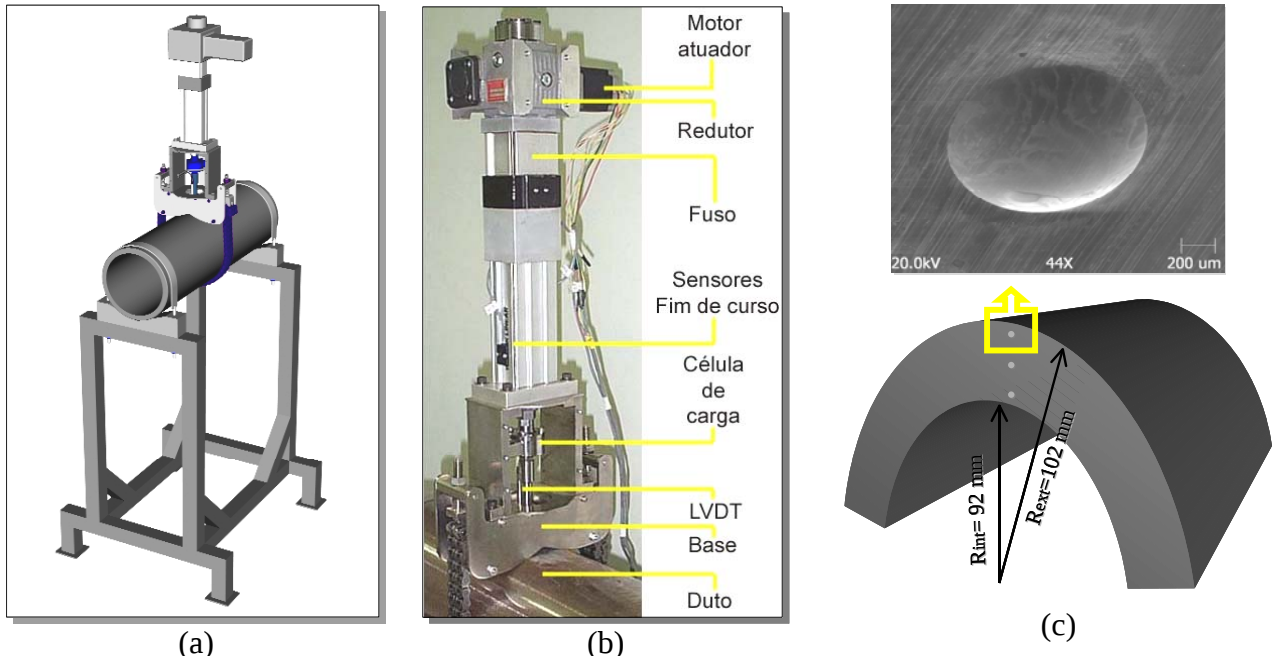
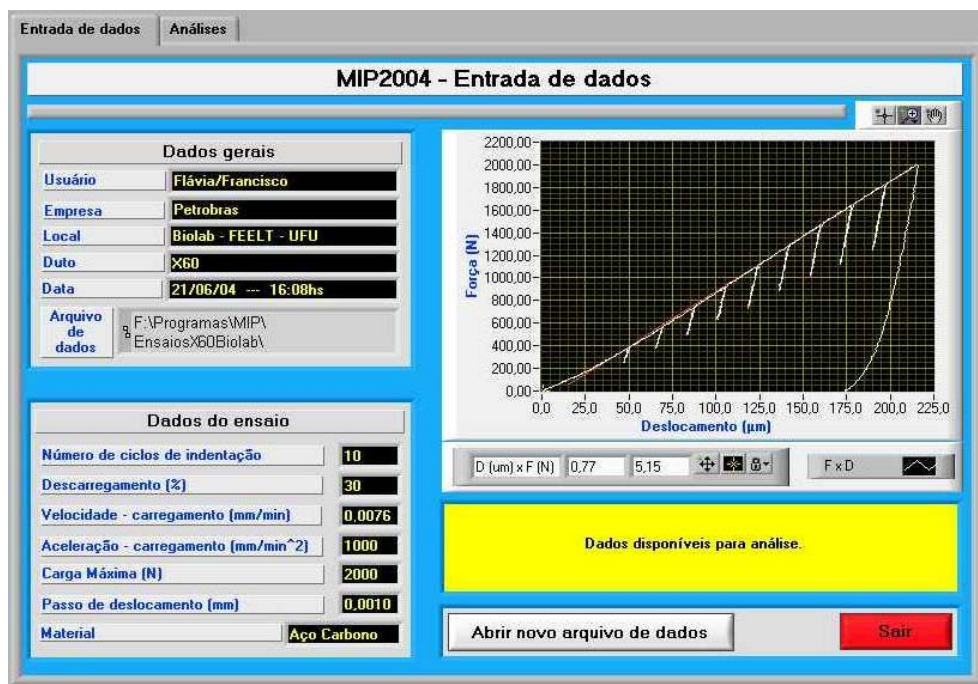
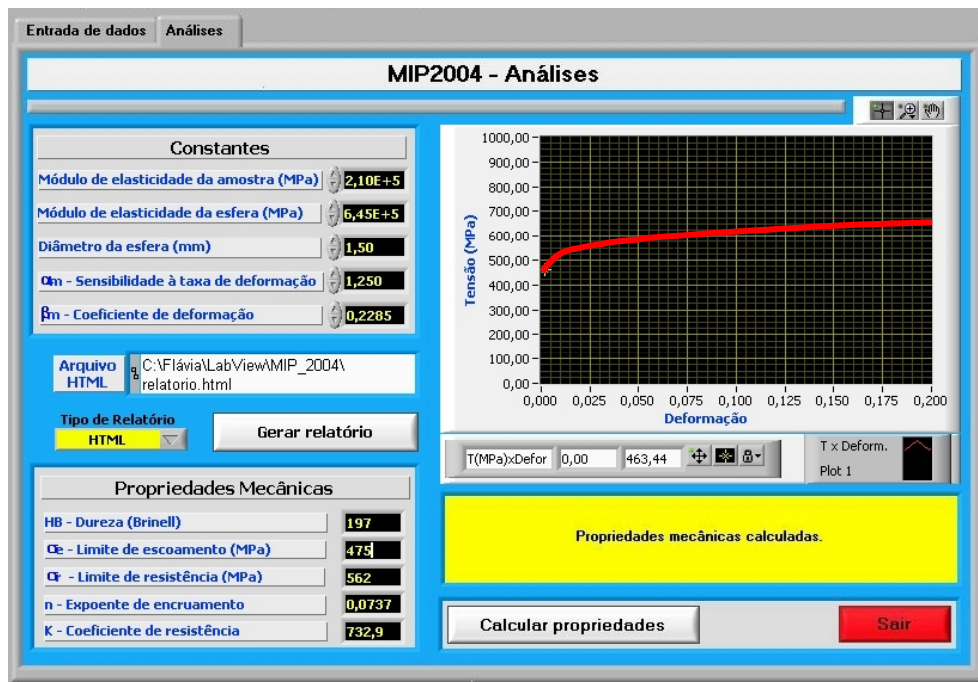


Figura 2: Ensaio de macroindentação instrumentada: (a) Equipamento desenvolvido, (b) detalhe do equipamento utilizado nos testes e (c) disposição dos ensaios de macroindentação e detalhe da impressão típica deixada na superfície ensaiada



(a)



(b)

Figura 3: Parâmetros usados nos ensaios de macroindentação instrumentada: (a) programa de supervisão do ensaio e (b) programa de cálculo das propriedades mecânicas

A título de comparação, foram feitos ensaios de macrodureza Brinell realizados na mesma disposição dos ensaios de macroindentação instrumentada. Os ensaios foram realizados em um durômetro universal da Wolpert (Dia Tester 2Rc) utilizando-se carga de 187,5 kgf.

Além disso, os resultados foram comparados com ensaios de tração realizados numa máquina da MTS (MTS-810) com capacidade 250 kN. Neste caso, foram testados 5 corpos de prova retirados na direção longitudinal do duto conforme indicações da norma API-5L, 2000.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das propriedades mecânicas médias, bem como seus respectivos desvios, são mostrados na Figura 4. No eixo da esquerda são mostradas as propriedades estimadas no ensaio de macroindentação instrumentada. No eixo da direita do gráfico está representada a dureza Brinell.

Nota-se, que todas as propriedades mecânicas dadas pelo ensaio de macroindentação instrumentada decaem na medida em que se avança da face interna do duto para a face externa do mesmo. Este comportamento é também muito bem corroborado pelos valores de dureza avaliados pelo método convencional.

Dados os reduzidos valores de desvio nas medições, pode-se dizer que existe um gradiente linear de propriedades na espessura do duto. Este fato pode estar associado ao processo de fabricação do duto, que, dependendo do caso, pode introduzir tensões residuais em diferentes níveis ao longo da espessura. Processos de fabricação de dutos sem costura, como o ilustrado na Figura 5, são normalmente realizados à quente, nas fases iniciais do processo, mas o acabamento final se dá a frio. Assim, não há recuperação microestrutural nem ocorrência de mecanismos de alívio de tensões no material acabado na face interna.

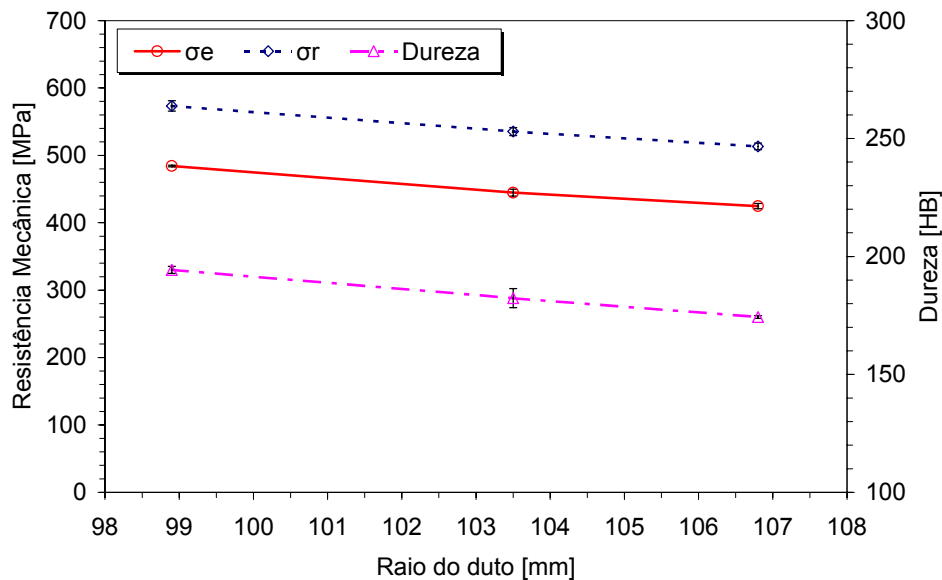


Figura 4: Resultados dos ensaios de macroindentação instrumentada e de dureza Brinell

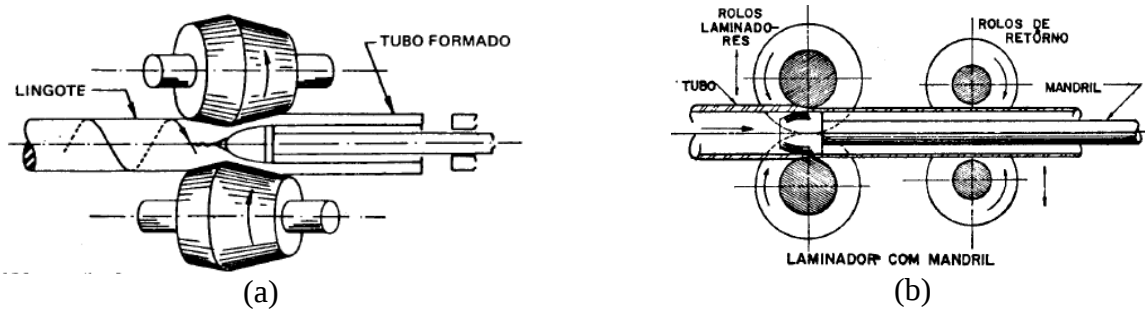
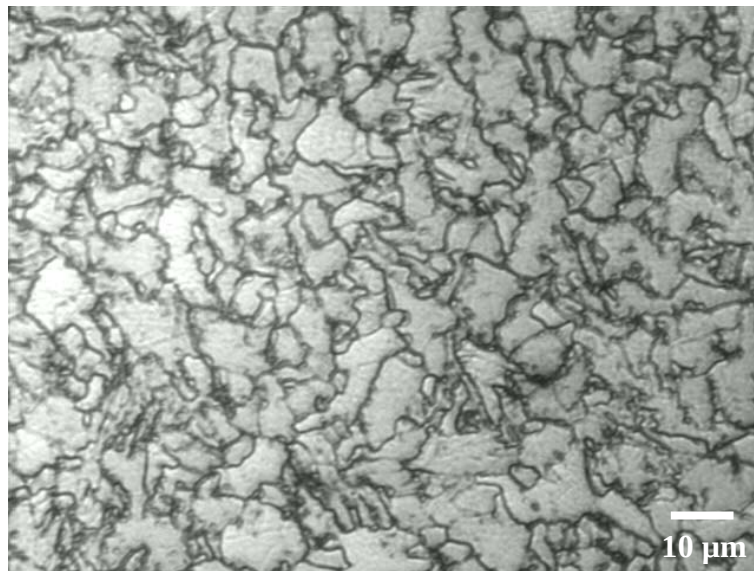


Figura 5: Processo Mannesmann® de fabricação do duto: (a) fase inicial do processo e (b) fase de acabamento (Silva Telles, 1992)

A microestrutura do material nas diferentes regiões do duto é mostrada na Figura 6. Estes resultados mostram que, aparentemente, os grãos na face interna encontram-se mais deformados e irregulares do que os da face externa, indicando, assim, a ocorrência de encruamento do material. Em princípio, isso se deve às pressões de contato durante o processo de fabricação serem maiores na região interna do duto durante a fabricação.

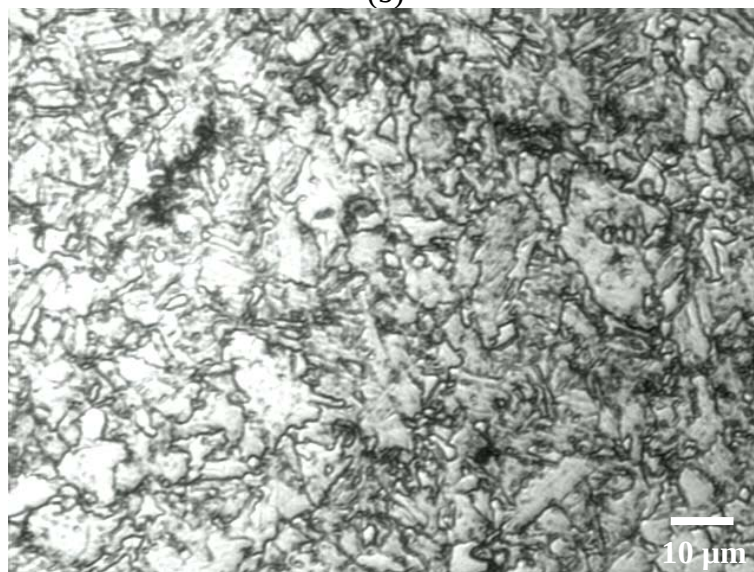
Adicionalmente, a Figura 7 apresenta os resultados das propriedades mecânicas obtidos pelos ensaios de macroindentação instrumentada comparados com o ensaio convencional de tração. A estimativa destes valores foi realizada a partir de procedimentos de cálculo automatizados usando-se as equações de 1 até 12. Nota-se a excelente correlação dos valores obtidos cujos erros não ultrapassam 5%. Este fato aliado à alta sensibilidade de sondagens em microrregiões remete à grande aplicabilidade da técnica de macroindentação instrumentada para avaliação de propriedades mecânicas de forma não destrutiva.



(a)



(b)



(c)

Figura 6: Microestrutura da seção do duto: (a) face externa, (b) região central da espessura e (c) face interna

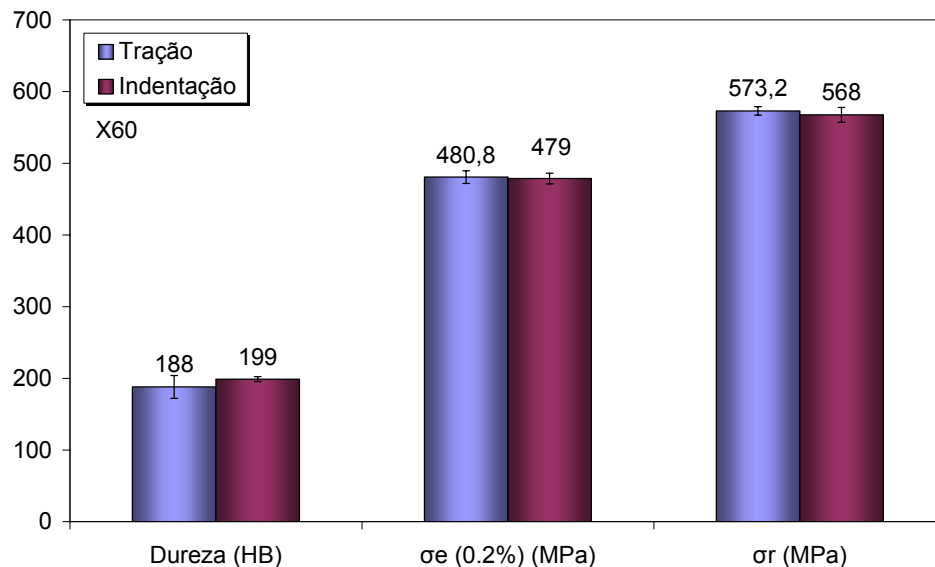


Figura 7: Comparação dos resultados de macroindentação instrumentada com os ensaios de tração

5. CONCLUSÕES

Foram realizados ensaios de macroindentação instrumentada ao longo da seção de um duto API-X60 e os resultados mostram que todas as propriedades mecânicas decaem na medida em que se avança da face interna do duto para a face externa do mesmo.

A existência de um gradiente linear de propriedades na espessura do duto pode estar associada ao processo de fabricação do duto devido à introdução de tensões residuais.

Os excelentes resultados de correlação com os ensaios convencionais aliados à alta sensibilidade de sondagens em regiões de peças e equipamentos remetem à grande aplicabilidade da técnica de macroindentação instrumentada para avaliação de propriedades mecânicas de forma não destrutiva.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Petrobras pelo apoio financeiro ao projeto.

7. REFERÊNCIAS

- API-5L, 2000, "Specification for Line Pipe", 42nd ed., American Petroleum Institute, 168 pages.
- 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, R.K. *et al.*, 1989, "Structural Integrity evaluation Based on an Innovative Field Indentation Macroprobe", ASME Vol.170, Book No.H00485, pp.101-107.
- Mathew, M.D., Murty, K.L., Rao, K.B.S. and Mannan, S.L., "Ball Indentation studies on the effect of aging on mechanical behaviour of alloy 625", Materials Science and Engineering A264 (1999) 159-166.
- Mok, C.H., 1996, Exp. Mech, 6 - 87.
- Paes, M.T.P. *et al.*, 2004, "Avaliação de Propriedades Mecânicas In Situ Através de Macroindentação Instrumentada", RT PETROBRAS/CENPES/TMEC N° 09/04.
- Ramos Neto, F.F., Cardoso, F.C., Soares, A.B., Franco, S.D., Franco, V.L.D. e Paes, M.T.P., 2003, "Instrumentação e Controle de Um Macroindentador Portátil para Avaliação de Propriedades Mecânicas de Dutos", Anais do 13° Seminário de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Silva Telles, P. C., 1992, "Tubulações Industriais", Editora LTC.

Tabor, D., 1951, “The Hardness of Metals”, Oxford University Press, New York.

Timoshenko, S.P., Goodier, J.N., 1970, “Theory of Elasticity”, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, N Y, pp. 409-414.

8. DIREITOS AUTORAIS

Caso não seja declarado o possuidor dos direitos autorais desta publicação (empresas, detentores de patentes, etc), os autores serão os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho. A não inclusão desta seção no texto acarretará na segunda prerrogativa.

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES GRADIENTS IN PIPELINES

Francisco F. Ramos Neto

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

Byron Gonçalves S. Filho

Petrobras, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello, Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ
byron@petrobras.com.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

Sinésio D. Franco

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Laboratório de Tribologia e Materiais, Campus Santa Mônica, Uberlândia - MG
ltm-sdfranco@ufu.br

Abstract: *The possibility of getting real information about mechanical properties of pipelines (yield strength, ultimate tensile strength and flow curves) can be so important to the operation control. The use of instrumented indentation tests (with continuous recording depth and load) carried through portable equipment, offers the possibility to access these properties with raised precision and rapidity. In this non-destructive test there isn't the necessity of removal material from the pipe and only a small spherical impression is printed on the surface (depth about 300 μm). In this work the main objective is to use an own developed instrumented ball indentation for an evaluation of mechanical properties gradients in pipeline. The results carried through in steel API X60 show the high potentiality of use of the instrumented ball indentation technique to evaluate the existence of small regions with mechanical properties gradients.*

Keywords: *Non-destructive tests, mechanical properties, pipelines, ball indentation.*