



INFLUÊNCIA DA TOPOGRAFIA SUPERFICIAL NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS MEDIDAS ATRAVÉS DE ENSAIOS DE MACROINDENTAÇÃO INSTRUMENTADA

Vívian Andrade Callegari

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

vicallegari@mecanica.ufu.br

Fernando Martins Ferreira

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

fmferreira@mecanica.ufu.br

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 propriedades mecânicas em dutos de condução de petróleo com diferentes rugosidades. Os resultados realizados em aços API X46 mostram que a variação da rugosidade não altera de forma significativa os valores das propriedades mecânicas medidas.*

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

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).

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 diferentes rugosidades com vistas à investigação da influência que o acabamento superficial causa nas propriedades mecânicas.

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.

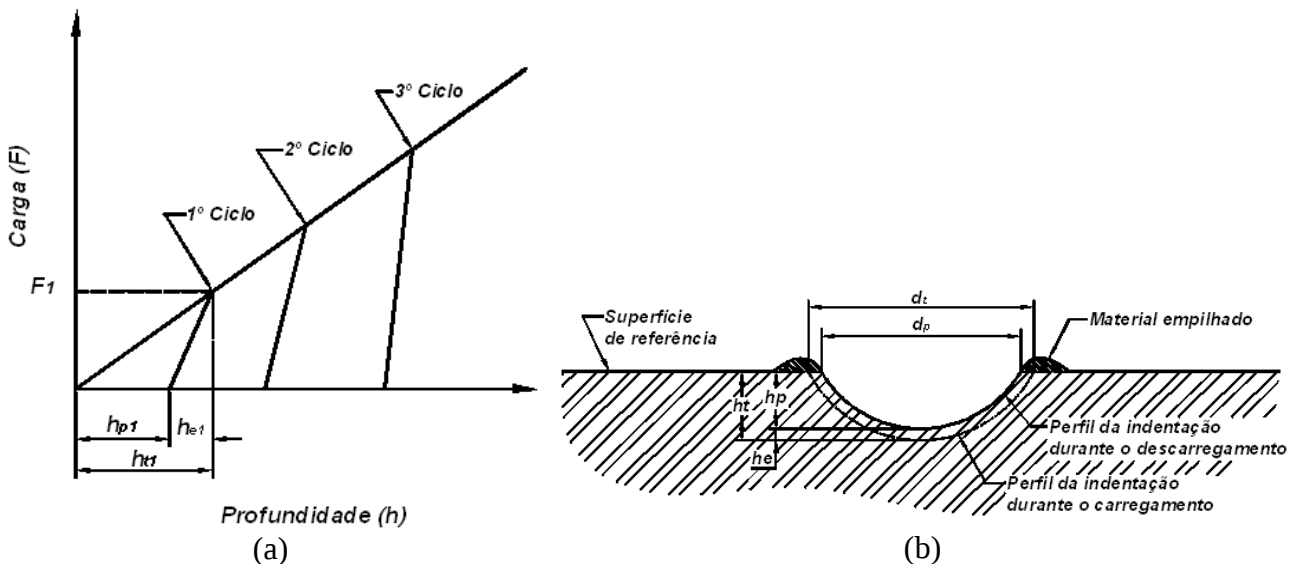


Figura 1: Ensaio de macroindentação instrumentada com a utilização de penetradores esféricos: (a) representação esquemática da relação entre a carga e a profundidade e (b) perfil típico do ciclo de carregamento e de descarregamento.

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 :

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

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

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

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

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 a partir 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 a partir 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 $\pm 0,1$ μ 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). A Figura 2 mostra esse equipamento e a impressão deixada após o ensaio de indentação.

Para a avaliação das propriedades mecânicas foram utilizados segmentos de dutos sem costura confeccionados em aço API-X46. Foram analisadas seções longitudinais destes dutos onde foram realizados ensaios variando a rugosidade, sendo as amostras preparadas com lixas de 60, 80, 220, 400, 600 *mesh*. As rugosidades foram medidas através de um interferômetro laser da marca UBM Messtechnik GMBH, modelo Expert IV. Para cada rugosidade foram realizadas três indentações, de onde foram extraídos os valores médios das propriedades mecânicas. Os parâmetros de teste usados nos ensaios de indentação são apresentados na Figura 3 (b).

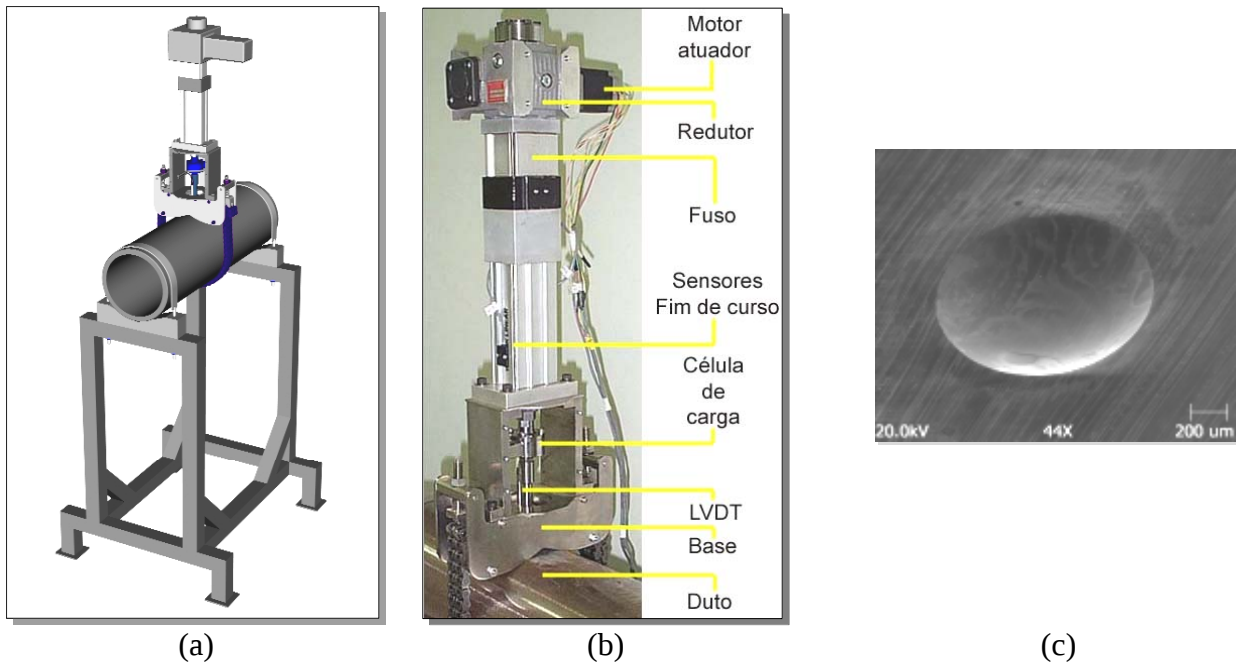
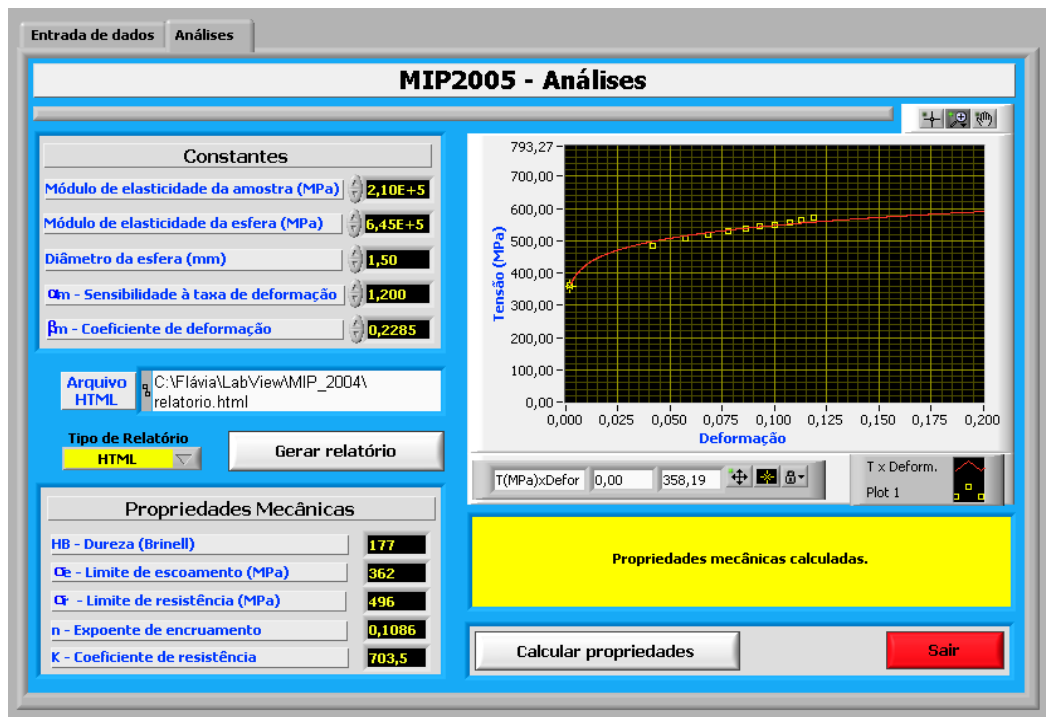


Figura 2: Ensaio de macroindentação instrumentada: (a) Equipamento utilizado, (b) detalhe do equipamento utilizado nos testes e (c) detalhe da impressão típica deixada na superfície ensaiada



Figura 3: Parâmetros usados no ensaio de macroindentação instrumentada: (a) programa de supervisão de ensaio, (b) programa de cálculo das propriedades mecânicas.

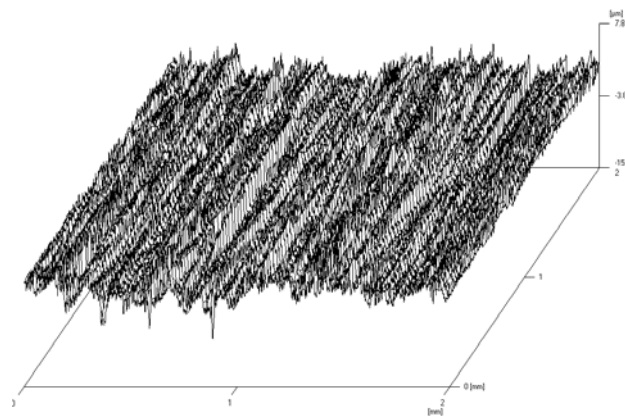


(b)

Figura 3: Continuação

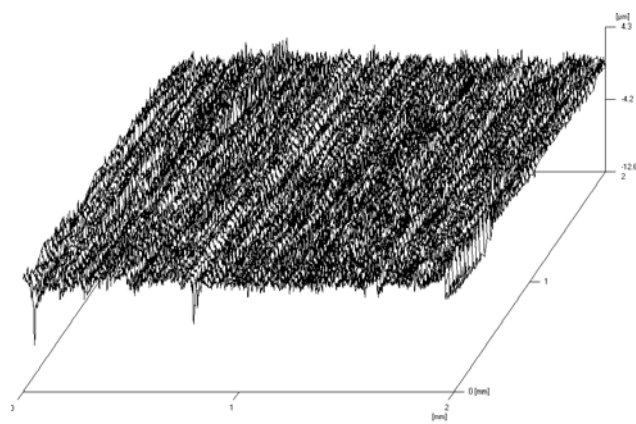
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 apresenta imagens obtidas através de interferometria laser das superfícies ensaiadas. Nelas é possível visualizar a topografia superficial das diferentes amostras. A Tabela 1 apresenta parâmetros de rugosidade para cada amostra. Pode-se observar que os valores da Tabela 1 variam consideravelmente, sendo a rugosidade média R_a para a lixa de 60 *mesh* de $0,75\mu\text{m}$, e para a lixa de 600 *mesh* de $0,15\mu\text{m}$.

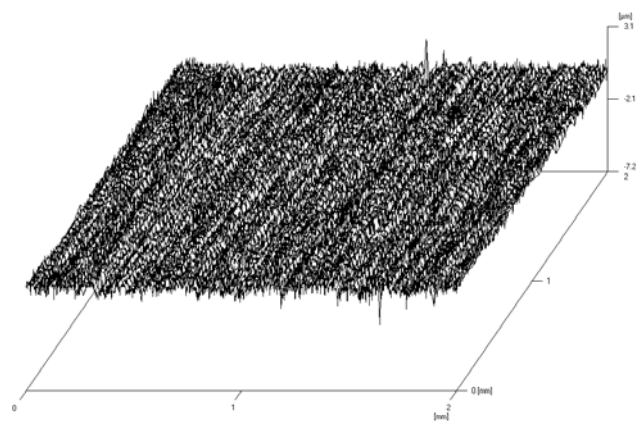


(a)

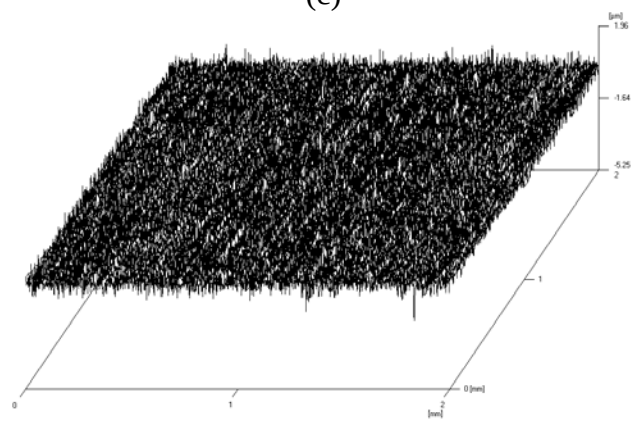
Figura 4: Superfícies ensaiadas: (a) Lixa 60, (b) Lixa 80, (c) Lixa 220, (d) Lixa 400 e (e) Lixa 600



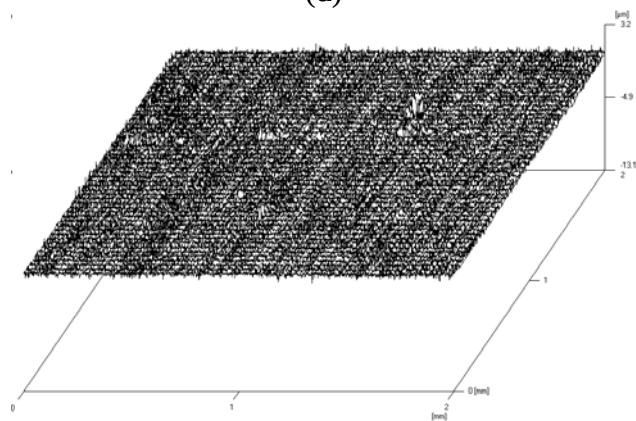
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4: Continuação

Tabela 1: Especificações de acabamento superficial.

Lixa	Rugosidade Média (Ra), μm .	Rugosidade Média Quadrática (Rq), μm .	Rugosidade Total (Rt), μm .
60	0,75	0,95	6,62
80	0,39	0,52	6,95
220	0,20	0,26	4,17
400	0,18	0,24	2,38
600	0,15	0,22	5,16

As propriedades mecânicas médias medidas, bem como seus respectivos desvios-padrão, são mostrados na Figura 5. Nota-se, que a variação granulométrica da lixa usada na preparação das amostras não interfere de forma significativa nas propriedades mecânicas avaliadas. Em todos os ensaios realizados, a dureza média foi de aproximadamente 170HB, o limite de escoamento de 350 MPa e o limite de resistência de aproximadamente 480 MPa.

Para as lixas utilizadas, o encruamento da superfície causado pela deformação plástica não influenciou nos valores de propriedades mecânicas medidas. Isso se explica pelo fato de que a profundidade de indentação é muito superior à rugosidade total. Os valores de profundidade de indentação são da ordem de 160 μm (ver Figura 3a), enquanto a maior rugosidade total encontrada nas amostras foi de cerca de 7 μm .

Desta forma, pode-se concluir que durante a operação de preparação da superfície de teste para os ensaios de indentação com cargas de pelo menos 1200 N, pode ser realizada numa única etapa utilizando lixa abrasiva de granulometria 60 mesh.

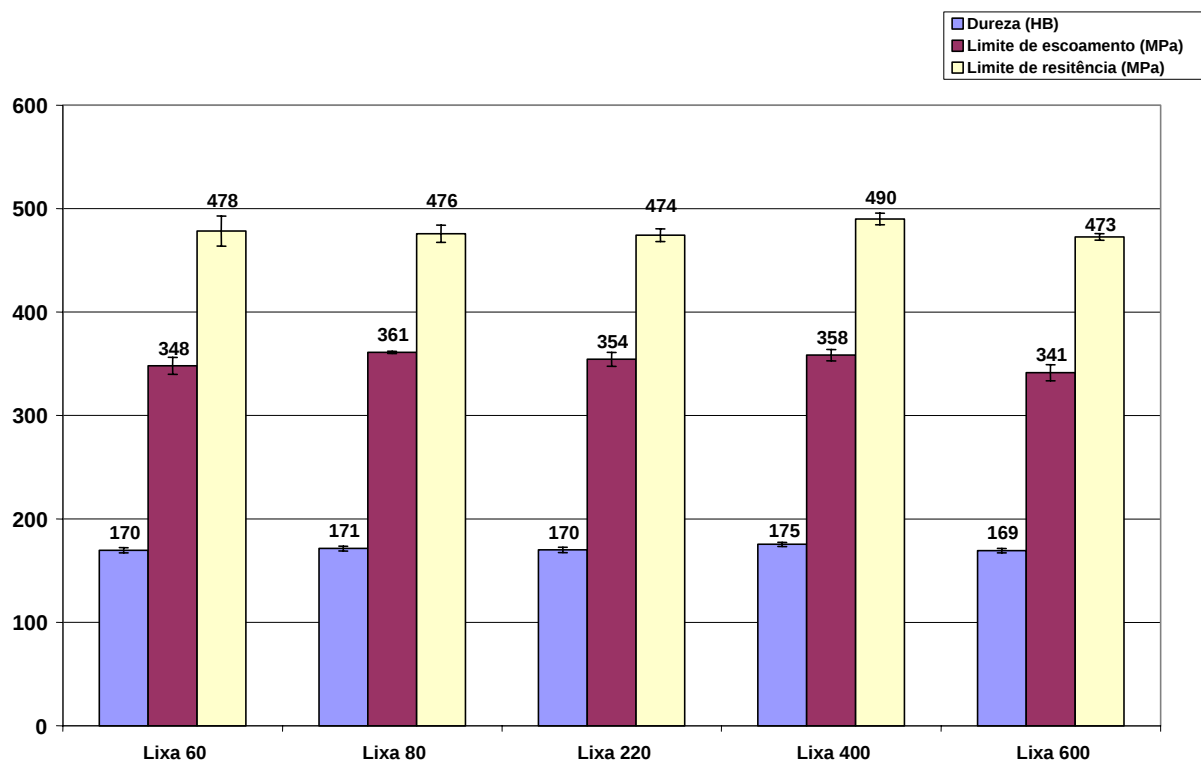


Figura 5: Resultados dos ensaios de macroindentação instrumentada.

5. CONCLUSÕES

Foram realizados ensaios de macroindentação instrumentada em amostras de um duto confeccionado no aço API X46. Os resultados obtidos mostram 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*, sem que haja quaisquer influências nas propriedades mecânicas a serem medidas.

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 behavior 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 Nº 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 13º 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.

INFLUENCE OF SURFACE PREPARATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES MEASURED BY BALL INDENTATION TESTS

Vívian Andrade Callegari

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

vicallegari@mecanica.ufu.br

Fernando Martins Ferreira

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

fmferreira@mecanica.ufu.br

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, 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 (depth of up to 300 μm). The aim of this work is to identify the effects of the surface topography generated during the test preparation upon the measured mechanical properties when using the instrumented ball indentation test. The results obtained with an API X46 steel show that the surface topography produced by grinding the pipeline do not have a significant influence on the mechanical properties.*

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