

# DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS ATRAVÉS DE ENSAIOS DE MACROINDENTAÇÃO INSTRUMENTADA: INFLUÊNCIA DA PRESSÃO INTERNA E DA TOPOGRAFIA SUPERFICIAL EM DUTOS<sup>1</sup>

Vívian Andrade Callegari<sup>2</sup>  
Fernando Martins Ferreira<sup>3</sup>  
Byron Gonçalves S. Filho<sup>4</sup>  
Marcelo T. Pizza Paes<sup>5</sup>  
Alcimar Barbosa Soares<sup>6</sup>  
Sinésio D. Franco<sup>7</sup>

## Resumo

A macroindentação instrumentada consiste na monitoração contínua da carga e da profundidade de indentação durante o teste. Através deste processo é possível identificar as propriedades do material em análise, tais como: dureza, limite de escoamento, limite de resistência de engenharia, tensões residuais, entre outras. A utilização de equipamentos portáteis baseados no ensaio de macroindentação instrumentada possibilita a obtenção destas propriedades, sem a necessidade de remoção de material, caracterizando um ensaio não destrutivo. Esta facilidade é demandada pelos operadores de dutos, que necessitam conhecer as propriedades dos dutos que se encontram já em funcionamento. No âmbito operacional podem ser encontradas diferentes topografias superficiais e pressões internas nos dutos, o que motivou o estudo da influência destes parâmetros na medição das propriedades dos materiais através da macroindentação instrumentada. Foram testadas diferentes topografias e pressões internas com o objetivo de avaliar estas influências nos resultados dos ensaios, porém não foram encontradas variações significantes nos valores das propriedades medidas.

**Palavras-chave:** Ensaio não-destrutivo; Propriedades mecânicas; Dutos; Macroindentação instrumentada; Rugosidade; Pressão interna.

## NONDESTRUCTIVE MEASUREMENT OF PIPELINE MECHANICAL PROPERTIES USING MACROINDENTATION - INFLUENCE OF SURFACE TOPOGRAPHY AND INTERNAL PRESSURE

### Abstract

The automated indentation consists of a continuous load and depth monitoring of indentation during the test. Through this process it is possible to identify the properties of the analyzed material, such as: hardness, yield strength, ultimate tensile strength, residual stresses, and others. The use of portable equipments based on automated indentation makes possible the attainment of these properties without material removal, characterizing it as a non-destructive testing. This facility is demanded by ducts operators, who need to identify the properties of ducts that are found already in functioning. In the operational scope, different superficial topographies and internal pressures in ducts can be found, what motivated the study of the influence of these parameters in the measurement of the materials properties through instrumented indentation. Different topographies and internal pressures were simulated to evaluate these influences over the tests results, however significant variations in the values of the measured properties had not been found.

<sup>1</sup> Contribuição a ser apresentada no 61º Congresso Anual, 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro - RJ - Brasil.

<sup>2</sup> Graduando, Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) - Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

<sup>3</sup> Graduando, LTM / FEMEC / UFU.

<sup>4</sup> Engenheiro, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello, Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ.

<sup>5</sup> Engenheiro, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello, Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ.

<sup>6</sup> Professor Ph.D. Faculdade de Engenharia Elétrica- Universidade Federal de Uberlândia.

<sup>7</sup> Professor Dr.-Ing. Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia

## 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, limite de 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 as empresas. 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 à 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).<sup>(1)</sup>

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 a analisar os efeitos da topografia superficial e das pressões internas em dutos nos resultados dos ensaios de macroindentação instrumentada.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

A avaliação de propriedades mecânicas via indentação instrumentada, tais como: limite de escoamento, limite 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.<sup>(2,3)</sup> 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,<sup>(4)</sup> 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;

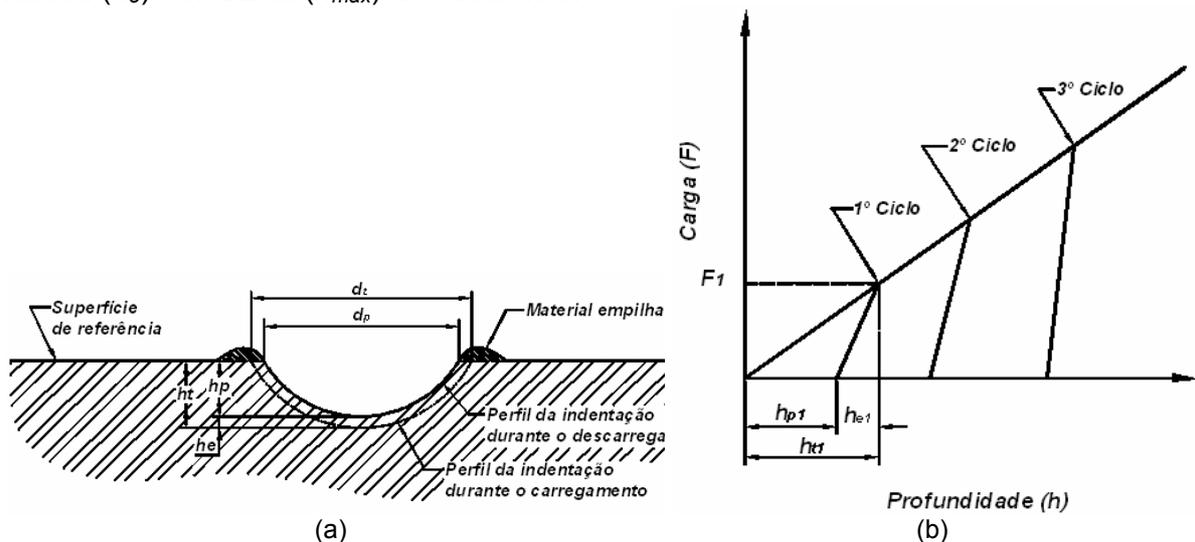
2 - a deformação da indentação correlaciona-se com a deformação plástica verdadeira em um teste de tração uniaxial;

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.<sup>(2)</sup> 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 a profundidade de indentação ( $h_p$ ) associada com a deformação plástica seja 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 (Figura 1-a).<sup>(5)</sup>

Nos múltiplos ciclos do ensaio de macroindentação instrumentada ocorrem processos consecutivos de encruamento, tanto do material anteriormente deformado, quanto do material novo. Conseqüentemente, 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-b). 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) perfil típico do ciclo de carregamento e de descarregamento e (b) representação esquemática da relação entre a carga e a profundidade.

Tabor <sup>(4)</sup> estabeleceu a relação entre a deformação plástica verdadeira ( $\varepsilon_v$ ) 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 Indentação Esférica Instrumentada (IEI) é 20%, quando  $d_p=D$ . Usando a equação de Hertz, <sup>(6)</sup> 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. <sup>(7)</sup>

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

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

Onde:  $F$  - carga de indentação;  $d_p$  - diâmetro plástico da impressão (eq.3);  $\varepsilon_v$  - deformação plástica verdadeira;  $\sigma_v$  - tensão verdadeira e  $\delta$  - parâmetro que depende das características do equipamento e da tensão de indentação ( $\tau$ ) (eq. 4).

O cálculo de  $d_p$  é dado pela equação a seguir:

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

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.

O valor de  $\delta$  pode ser obtido da equação 4:

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

Os valores de  $\phi$ ,  $\delta_{max}$  e  $\tau$  são obtidos a partir das equações (5),(6) e (7):

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

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

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

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

A faixa de escoamento plástico da curva de tensão verdadeira ( $\sigma_v$ ) *versus* deformação plástica verdadeira ( $\varepsilon_v$ ) pode ser representada por uma função de potência, equação (8).

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

Onde:  $K$  e  $n$  - coeficiente e expoente de encruamento, respectivamente;  $\sigma_v$  - tensão verdadeira (eq. 1) e  $\varepsilon_v$  - 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 ( $\sigma_r$  - 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  $d_f/D$  versus  $P/d_f^2$  e o parâmetro de teste do material ( $A$ ) pode então ser usado para calcular o limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) do material, usando a seguinte relação:

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

Onde:  $\beta_m$  é uma constante do tipo de material.<sup>(6)</sup>

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].

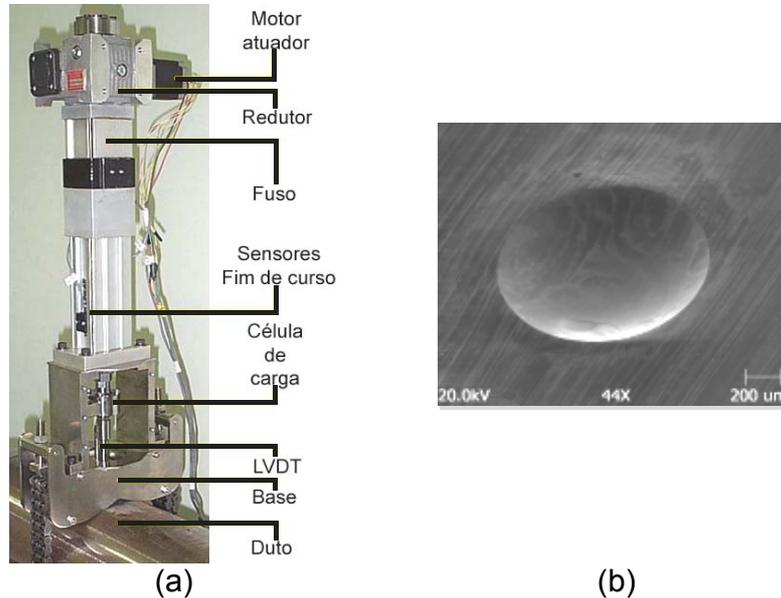
### 3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios de indentação instrumentada foram realizados em um equipamento portátil desenvolvido numa parceria da Petrobras com a Universidade Federal de Uberlândia.<sup>(8)</sup> O equipamento possui como principais características: carga máxima de teste de 5 kN e resolução  $\pm 1$  N; deslocamento máximo de 25 mm e resolução no posicionamento de  $\pm 0,1 \mu\text{m}$  (Figura 1). 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 da influência da rugosidade nas 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 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.

Para a análise da influência da pressão interma, os ensaios foram realizados em um duto sem costura confeccionado em aço API X-60, com diâmetro interno de 192 mm, diâmetro externo de 218 mm e 750 mm de comprimento. O duto foi pressurizado com água e foram realizados ensaios variando a pressão de 0, 25, 50, 75 e 100 bar. As pressões foram medidas em um manômetro da marca WIKA (fundo de escala 20 bar). Para cada pressão foram realizados cinco ensaios e calculados os valores médios das propriedades mecânicas e seus desvios padrões.

Para os cálculos das propriedades mecânicas foram utilizados os valores para as constantes  $\alpha_m$  e  $\beta_m$ : 1,200 e 0,2285, respectivamente.



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

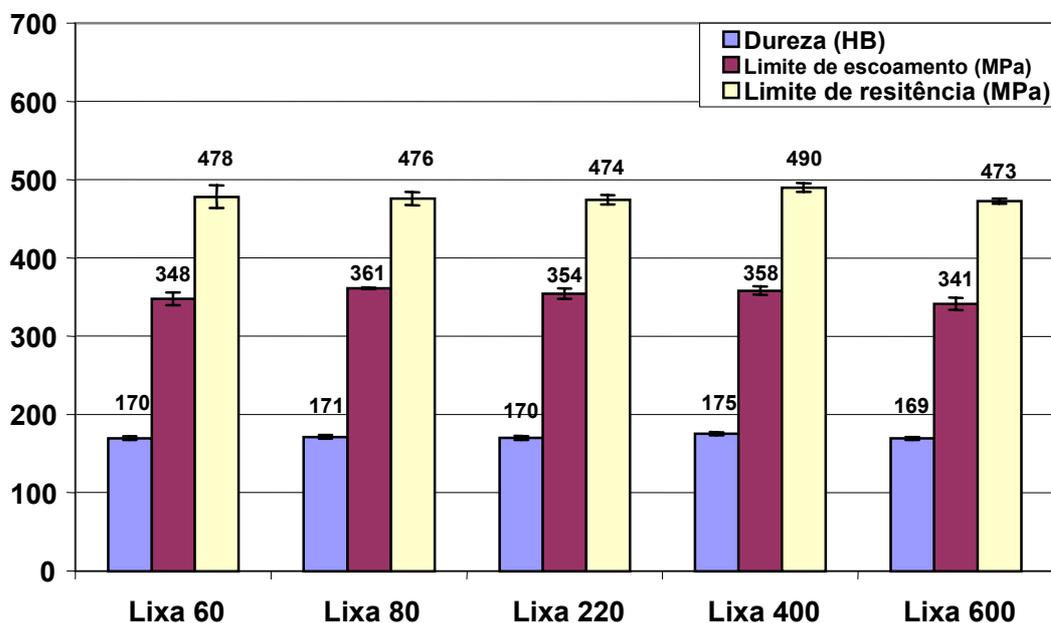
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Efeitos da Topografia Superficial nos Resultados de Indentação

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de rugosidade para cada amostra. Pode-se observar que os valores da Tabela 1 variam consideravelmente, sendo a rugosidade média Ra para a lixa de 60 *mesh* de 0,75  $\mu\text{m}$  e para a lixa de 600 *mesh* de 0,15  $\mu\text{m}$ .

**Tabela 1.** Parâmetros de rugosidade das amostras testadas

Lixa	Rugosidade Média (Ra), $\mu\text{m}$ .	Rugosidade Média Quadrática (Rq), $\mu\text{m}$ .	Rugosidade Total (Rt), $\mu\text{m}$ .
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



**Figura 3.** Resultado dos ensaios de macroindentação instrumentada, variando a rugosidade das amostras de aço API X-46; carga de teste – 120 kgf.

As propriedades mecânicas médias medidas para o aço API X-46, bem como seus respectivos desvios padrões, são mostrados na Figura 3. Nota-se, que a variação granulométrica da lixa usada na preparação das amostras não interfere de forma significativa nas propriedades mecânicas avaliadas, pois não foram observadas tendências de aumento ou redução destas propriedades à medida que a rugosidade foi alterada entre  $0,15 \mu\text{m}$  e  $0,75 \mu\text{m}$ . 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. Os valores mínimos esperados para esse aço, de acordo com a literatura é 323 MPa para o limite de escoamento e 443 MPa para o limite de resistência, o que mostra consistência nos resultados, uma vez que o processo de fabricação nos dutos sem costura gera encruamento do material, o que altera os valores das propriedades mecânicas.<sup>(9)</sup>

Durante o processo de lixamento, o encruamento superficial causado pela deformação plástica não influenciou nos valores das propriedades mecânicas medidas. Isso se explica pelo fato da profundidade de indentação ser muito superior à rugosidade total. Os valores de profundidade de indentação são da ordem de  $160 \mu\text{m}$ , enquanto a maior rugosidade total encontrada nas amostras foi de cerca de  $7 \mu\text{m}$  (ver Tabela 1). Com isso podemos atribuir as variações a erros sistemáticos do ensaio, que podem ser gerados pelo equipamento, imperfeições superficiais e a não homogeneidade do material.

Desta forma, pode-se concluir que 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*.

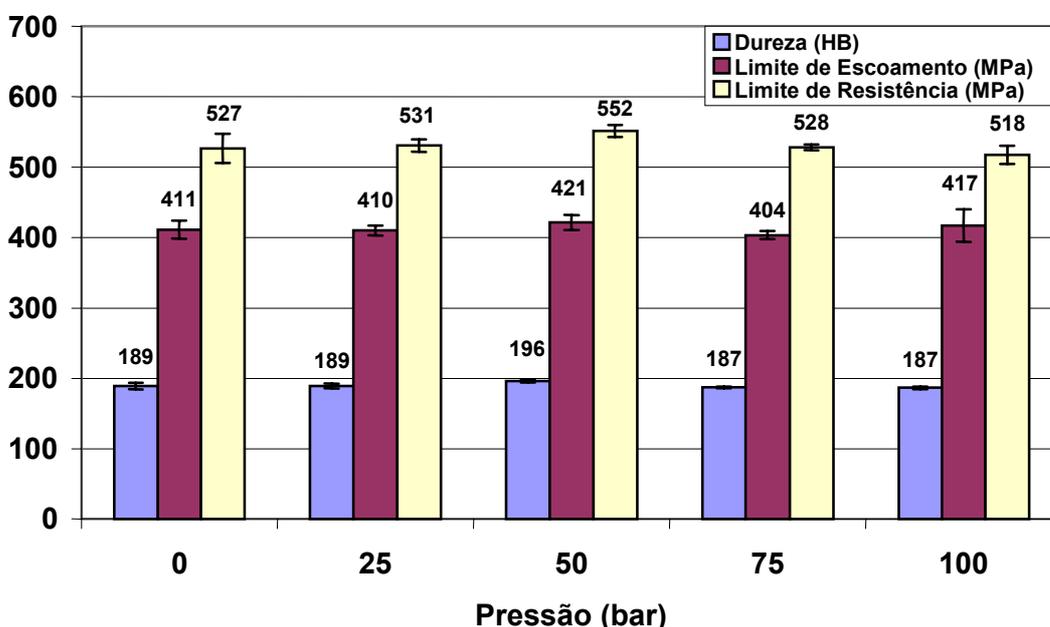
## 4.2 Efeitos da Pressão Interna nos Resultados de Indentação

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios no duto pressurizado. Foram determinados as médias e desvios padrões do limite de escoamento ( $\sigma_e$ ), limite de resistência ( $\sigma_r$ ) e da dureza Brinell para os cinco ensaios nas diferentes pressões. A Figura 4 apresenta as propriedades mecânicas medidas. Observa-se, que os valores dos ensaios não variaram de forma significativa com a pressão interna nos dutos na faixa analisada de 0 a 100 bar.

**Tabela 2.** Dados obtidos nos ensaios de macroindentação instrumentada para o duto API X-60 sob diferentes pressões.

Pressão Interna	Propriedades	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Média	Desvio Padrão
0 (bar)	$\sigma_e$ (MPa)	402	405	416	401	432	411	13,1
	$\sigma_r$ (MPa)	564	517	517	517	520	527	20,7
	Dureza HB	197	187	186	185	190	189	4,8
25 (bar)	$\sigma_e$ (MPa)	411	406	403	422	409	410	7,3
	$\sigma_r$ (MPa)	537	522	523	543	529	531	9,1
	Dureza HB	191	186	186	194	189	189	3,4
50 (bar)	$\sigma_e$ (MPa)	415	421	423	438	410	421	10,6
	$\sigma_r$ (MPa)	558	543	545	549	563	552	8,6
	Dureza HB	197	194	194	198	198	196	2,0
75 (bar)	$\sigma_e$ (MPa)	411	407	399	397	404	404	5,7
	$\sigma_r$ (MPa)	526	534	530	528	523	528	4,1
	Dureza HB	188	189	187	187	186	187	1,1
100 (bar)	$\sigma_e$ (MPa)	400	409	401	419	456	417	23,1
	$\sigma_r$ (MPa)	527	510	533	517	501	518	12,8
	Dureza HB	187	186	184	189	187	187	1,8

### Varição da Pressão Interna do Duto



**Figura 4.** Efeito da pressão interna do duto (API -X60) nas propriedades mecânicas medidas através de macroindentação instrumentada.

Comparando-se os valores das propriedades médias com a pressão de 0 (zero) bar com os valores das propriedades mecânicas medidas a 100 bar, nota-se que as variações são muito pequenas. Pode-se atribuir as pequenas variações (3%) nas propriedades mecânicas à não homogeneidade do material, as imperfeições e impurezas do material e a erros sistemáticos do ensaio.

Não há nenhuma relação direta entre a pressão interna com as propriedades medidas, porém é necessária uma melhor investigação sobre a influencia desse parâmetro.<sup>(10)</sup>

Com isso, pode-se concluir que os ensaios de macroindentação instrumentada podem ser realizados com os dutos operando, sem que os resultados analisados sofram influência significativa.

## 5 CONCLUSÕES

Foram realizados ensaios de macroindentação instrumentada em amostras de um duto confeccionado no aço API X-46. 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.

Os ensaios realizados no duto confeccionado no aço API X-60 mostram que a variação da pressão interna também não influencia de maneira significativa os valores das propriedades mecânicas medidas. Portanto, os ensaios podem ser realizados com os dutos operando sem que haja alteração nas propriedades mecânicas.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a Petrobras pelo apoio financeiro ao projeto.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 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.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 Tabor, D., 1951, "The Hardness of Metals", Oxford University Press, New York.
- 5 Mok, C.H., 1996, Exp. Mech, 6 - 87.
- 6 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.
- 7 Timoshenko, S.P., Goodier, J.N., 1970, "Theory of Elasticity", 3rd ed., McGraw-Hill, New York, N Y, pp. 409-414.
- 8 Paes, M.T.P. *et al*, 2004, "Avaliação de Propriedades Mecânicas In Situ Através de Macroindentação Instrumentada", RT PETROBRAS/CENPES/TMEC Nº 09/04.
- 9 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 Seminário de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- 10 Kania, R., Russell, A., Gao, M., 2003, "Advanced indentation systems for tensile properties evaluation of in-service pipelines", Congresso internacional de ductos, Puebla, Puebla.

### **BIBLIOGRAFIA**

- 1 API-5L, 2000, "Specification for Line Pipe", 42nd ed., American Petroleum Institute, 168 pages.
- 2 Silva Telles, P. C., 1992, "Tubulações Industriais", Editora LTC.