

DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE ESCOAMENTO DE AÇOS VIA ENSAIO DE MACROINDENTAÇÃO INSTRUMENTADA USANDO O MODELO PROPOSTO POR HAGGAG

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

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

Resumo. O ensaio de macroindentação instrumentada realizado *in situ*, por ser não destrutivo e utilizar equipamentos portáteis, é uma alternativa na determinação de propriedades mecânicas de tração de estruturas nas quais a remoção de corpos de prova, para realização de ensaios de tração, implica em grandes custos devido à interrupção da operação do equipamento, como é o caso de dutos para escoamento de petróleo. O modelo proposto por Haggag tem sido utilizado para estimar o limite de escoamento de aços a partir da curva “força x deslocamento”, obtida no ensaio de macroindentação. Porém, a aplicação deste modelo depende do conhecimento de um parâmetro empírico β_m , para o qual o valor de 0,2285 é normalmente adotado para aços-carbono. Os resultados apresentados no presente trabalho mostram que $\beta_m=0,2285$ não é aplicável a todos os aços, além do valor deste parâmetro ser função do diâmetro do penetrador e da força máxima utilizados no ensaio. Uma nova metodologia de cálculo do limite de escoamento é apresentada, através da introdução de um novo parâmetro, b_m (“offset de escoamento”), e novos valores para β_m e b_m são propostos.

Palavras chave: macroindentação instrumentada, Modelo de Haggag, limite de escoamento.

1. INTRODUÇÃO

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

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

Utilizando-se o ensaio de macroindentação instrumentada é possível obter, de forma rápida e com boa aproximação, as propriedades mecânicas de tração dos materiais metálicos de equipamentos, sem que para isso seja necessário retirar amostras e, conseqüentemente, sem interrupção da operação (Ramos Neto *et al.*, 2004). Isso é extremamente importante na indústria de óleo e gás, na qual a parada de equipamentos envolve enormes custos operacionais e lucro cessante.

O ensaio de macroindentação instrumentada consiste na indentação controlada de uma superfície, usando um penetrador esférico, através de múltiplos ciclos (normalmente entre 7 e 10) de carregamento e descarregamento em um mesmo ponto. Os descarregamentos intermediários são parciais (entre 30 e 40%), enquanto ao final do ensaio ocorre o descarregamento total. A força aplicada e a profundidade de penetração são medidas continuamente através de uma célula de carga e de um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), respectivamente (Fig. 1-b).

Haggag *et al.* (1989) propuseram um modelo que permite estimar o limite de escoamento do material a partir dos dados da curva “força x deslocamento” (Fig. 1-c). Para cada ciclo do ensaio, a profundidade total (h_t) é medida enquanto a força é aplicada e o diâmetro total (d_t) pode ser calculado pela Eq. (1), usando a relação de área projetada do penetrador esférico de diâmetro D . Os pontos de todos os ciclos de carregamento são ajustados por uma análise de regressão linear à relação de Meyer (Eq. (2)).

$$d_t = 2 \cdot \sqrt{h_t \cdot D - h_t^2} \quad (1)$$

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

Onde: F é a força aplicada, m é o coeficiente de Meyer e A é um parâmetro de teste do material.

A partir da regressão dos dados de d_t/D versus F/d_t^2 , os valores de A e m são obtidos e o parâmetro de teste (A) pode então ser usado para calcular o limite de escoamento do material (σ_e) através da Eq. (3).

$$\sigma_e = \beta_m \cdot A \quad (3)$$

Onde: β_m é um “parâmetro de deformação” que depende do tipo de material ensaiado (Haggag *et al.*, 1989).

Vários trabalhos propõem que seja adotado $\beta_m = 0,2285$ para aços-carbono (Haggag *et al.*, 1989; Ramos Neto *et al.*, 2004; Franco, 2007; Ferreira, 2010). Franco (2007), utilizando a Eq. (3) e $\beta_m = 0,2285$, obteve boas estimativas para aços-carbono com limites de escoamento próximos de 350 MPa, mas foram observados grandes desvios em relação aos ensaios de tração para aços com resistências mais elevadas.

Alguns trabalhos sugerem uma generalização da Eq. (3) (Kania *et al.*, 2004), através da introdução de mais um termo, b_m , denominado de “offset de escoamento”, de acordo com a Eq. (4). Kania *et al.* (2004) mostraram que os valores de β_m e b_m que devem ser introduzidos na Eq. (4), para estimativa do limite de escoamento de aços, dependem do diâmetro do penetrador.

$$\sigma_e = \beta_m \cdot A + b_m \quad (4)$$

Consequentemente, a estimativa do limite de escoamento por meio de ensaios de macroindentação instrumentada, utilizando o Modelo de Haggag, depende do conhecimento dos parâmetros β_m e b_m . Assim, este trabalho tem os objetivos de identificar a equação mais indicada (Eq. (3) ou Eq. (4)) para o cálculo do limite de escoamento de aços e determinar os valores dos parâmetros β_m e b_m , bem como avaliar os efeitos das condições de ensaio sobre esses parâmetros, dando especial atenção ao diâmetro do penetrador e à força máxima.

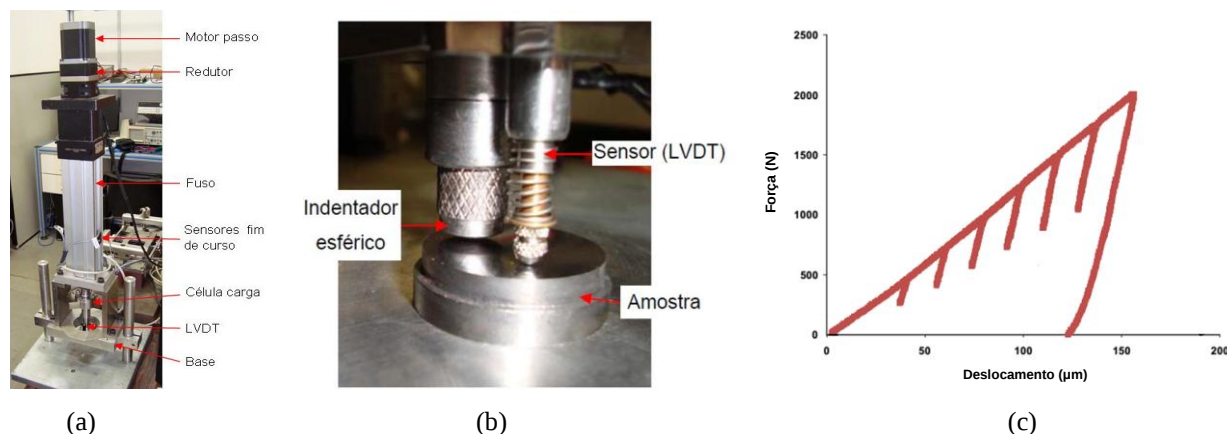


Figura 1. (a) Detalhe do equipamento de macroindentação instrumentada, (b) posicionamento do penetrador e do LVDT sobre a amostra e (c) curva “força x deslocamento” resultante do ensaio (Ferreira, 2010).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios de macroindentação instrumentada foram realizados em amostras de sete aços, utilizados na indústria de óleo e gás, com limites de escoamento e microestruturas distintas, conforme mostrado na Tab. (1). As amostras foram retiradas de tubos, por corte mecânico, para realização dos ensaios ao longo da espessura das mesmas.

Tabela 1. Limites de escoamento e microestruturas dos sete aços usados nos ensaios de macroindentação instrumentada.

Material (Aço)	Limite de Escoamento* (MPa)	Microestrutura
A	300	Ferrita + Perlita
B	462	Ferrita + Perlita
C	473	Ferrita + Finos Carbonetos Dispersos
D	586	Martensita Revenida + Ferrita
E	736	Martensita Revenida + Austenita Retida
F	779	Martensita Revenida + Ferrita
G	896	Martensita Revenida + Ferrita

* Resultados de ensaios de tração realizados pelo fabricante dos tubos.

O equipamento portátil *Prop in Situ* (Fig. 1-a), desenvolvido numa parceria entre a Petrobras, a FINEP e a Universidade Federal de Uberlândia (Ramos Neto *et al.*, 2004), foi usado na realização dos ensaios de macroindentação. Foram utilizados 10 ciclos, com descarregamentos intermediários de 40%, em todos os ensaios. Com os dados das curvas “força x deslocamento” e utilizando um programa de análise em LabView® (Ramos Neto *et al.*, 2004), desenvolvido para trabalhar com o Modelo de Haggag, foram estimados os limites de escoamento dos sete aços.

As superfícies das amostras foram retificadas nas faces inferior e superior, garantido a planeza e o paralelismo entre faces. Em cada amostra, a superfície na qual as indentações foram realizadas sofreu lixamento e posterior polimento (pasta de diamante com granulometria média de 6 μm). Em relação às distâncias entre indentações e espessura das amostras, foram adotadas as recomendações para ensaios de dureza Brinell, conforme especificações da norma ASTM E10-12.

Foi proposto um planejamento fatorial completo com três fatores: “material”, “relação $F_{\text{máx}}/D^2$ ” (onde $F_{\text{máx}}$ é a força máxima de ensaio) e “diâmetro do penetrador”. Ainda, adotaram-se sete níveis para o fator “material”, três níveis para o fator “relação $F_{\text{máx}}/D^2$ ”, dois níveis para o fator “diâmetro do penetrador” e cinco réplicas, para estimativa do erro experimental. Ao todo, 210 ensaios foram realizados.

Os dois níveis para o fator “diâmetro do penetrador” correspondem ao uso de penetradores esféricos com diâmetros de 1,5 mm e 1,0 mm, ambos de WC-Co. Os sete níveis referentes ao fator “material” correspondem aos sete aços identificados na Tab. (1).

A relação $F_{\text{máx}}/D^2$ foi usada para avaliar o efeito da força máxima de ensaio sobre a estimativa do limite de escoamento. Indentações geometricamente similares foram obtidas, para os dois diâmetros de penetradores utilizados, mantendo-se esta relação constante (Dieter, 1976). Os níveis de força máxima foram determinados tomando-se como referência o penetrador de 1,5 mm, com base em valores encontrados na literatura (Ramos Neto *et al.*, 2004; Franco, 2007; Ferreira, 2010), em normas (ASTM E10-12) e na capacidade da célula de carga utilizada (2 kN). A Tab. (2) mostra os níveis para o fator “relação $F_{\text{máx}}/D^2$ ” utilizados no planejamento fatorial.

Tabela 2. Níveis para o fator “relação $F_{\text{máx}}/D^2$ ” utilizados no planejamento fatorial.

Nível de Força Máxima	Penetrador $\varnothing = 1,5 \text{ mm}$		Penetrador $\varnothing = 1,0 \text{ mm}$	
	Força Máxima	Relação $F_{\text{máx}}/D^2$	Força Máxima	Relação $F_{\text{máx}}/D^2$
Inferior	662 N	$\approx 30,0 \text{ kgf/mm}^2$	294 N	$\approx 30,0 \text{ kgf/mm}^2$
Intermediário	1200 N	$\approx 54,4 \text{ kgf/mm}^2$	533 N	$\approx 54,4 \text{ kgf/mm}^2$
Superior	1800 N	$\approx 81,6 \text{ kgf/mm}^2$	800 N	$\approx 81,6 \text{ kgf/mm}^2$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. (2) mostra os limites de escoamento para os aços “A” à “G”, calculados utilizando o Modelo de Haggag, a partir da Eq. (3) e com $\beta_m = 0,2285$. Os resultados dos ensaios de tração também são apresentados, para comparação.

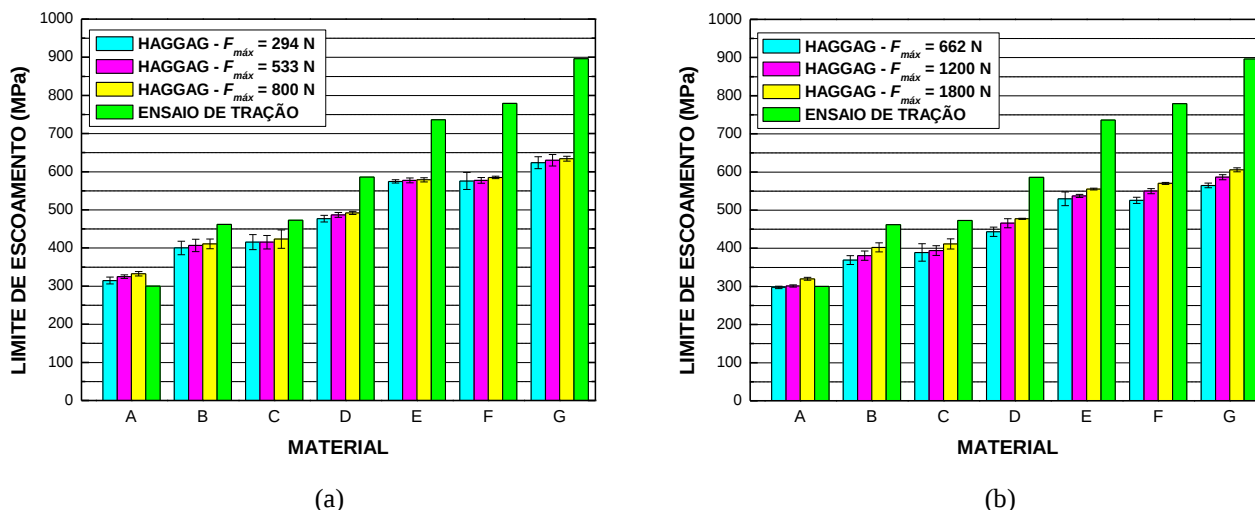


Figura 2. Limites de escoamento para os aços “A” à “G”, calculados usando o Modelo de Haggag: (a) penetrador esférico de 1,0 mm e (b) penetrador esférico de 1,5 mm. Os intervalos de 95% de confiança estão indicados.

A partir da Fig. (2), verifica-se que o Modelo de Haggag, usando a Eq. (3) e com $\beta_m = 0,2285$, permite diferenciar qualitativamente os aços e obter uma boa estimativa para o limite de escoamento do aço “A”. No entanto, para os aços “B” à “G” o modelo fornece valores inferiores aos determinados nos ensaios de tração, com os desvios ficando cada vez maiores à medida que a resistência do aço aumenta, indicando uma dependência em relação às propriedades do material. Além disso, nota-se uma influência do diâmetro do penetrador e da força máxima de ensaio nos resultados. Limites de escoamento maiores são obtidos para forças máximas superiores e para o penetrador de 1,0 mm. Os efeitos significativos dos fatores “diâmetro do penetrador” e “força máxima de ensaio” foram comprovados através de Análise de Variância (ANOVA).

Diante da impossibilidade de se estimar corretamente o limite de escoamento dos sete aços utilizando a Eq. (3) e $\beta_m = 0,2285$, foi investigado o uso da Eq. (4). Assim, para cada condição de ensaio (diâmetro do penetrador e força máxima) foi construído um gráfico correlacionando o limite de escoamento (valores da Tab. (1)) com o parâmetro A , determinado via ensaio de macroindentação. A relação entre o limite de escoamento (variável dependente) e o parâmetro A (variável independente) foi determinada através de regressão linear simples. A Fig. (3) mostra os resultados para a condição na qual foi usado o penetrador de 1,5 mm e força máxima de ensaio de 1800 N.

A Tab. (3) resume os resultados, apresentando os valores de β_m e b_m para as seis condições de ensaio avaliadas. Em todas as condições, o coeficiente de determinação (R^2) está muito próximo de 1, indicando excelentes ajustes das retas aos dados. Portanto, a Eq. (4) é mais indicada para o cálculo do limite de escoamento de aços.

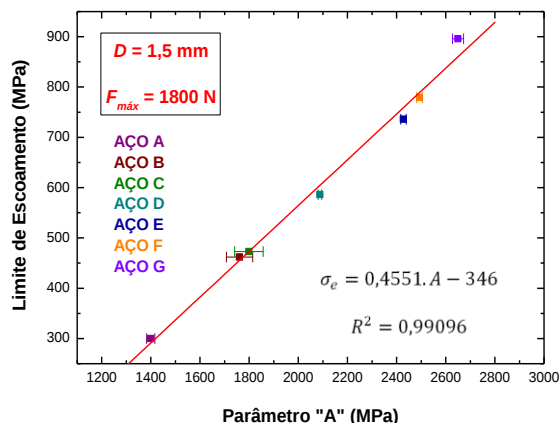


Figura 3. Correlação entre o parâmetro A e o limite de escoamento para os aços “A” à “G”. Os intervalos de 95% de confiança estão indicados.

Tabela 3. Valores dos parâmetros β_m e b_m em função do diâmetro do penetrador e da força máxima utilizados no ensaio de macroindentação instrumentada.

Diâmetro do Penetrador (mm)	Força Máxima (N)	β_m	b_m (MPa)	R^2
1,0	294	0,4217	-286	0,98994
	533	0,4275	-309	0,99105
	800	0,4324	-329	0,99236
1,5	662	0,4799	-331	0,98261
	1200	0,4543	-308	0,98718
	1800	0,4551	-346	0,99096

4. CONCLUSÕES

Sobre a estimativa do limite de escoamento de aços a partir de ensaios de macroindentação instrumentada, utilizando o Modelo de Haggag, os resultados obtidos permitem concluir que:

- O uso da Eq. (3) e do parâmetro $\beta_m = 0,2285$ não é satisfatório para todos os aços, pois os desvios na estimativa do limite de escoamento podem chegar a 35% para aços com elevada resistência (ex.: aço “G”);
- O uso da Eq. (4), com os valores dos parâmetros β_m e b_m mostrados na Tab. (3), permite estimar o limite de escoamento de aços, independente da resistência mecânica dos mesmos. Portanto, os parâmetros β_m e b_m , mostrados na Tab. (3), são independentes das propriedades mecânicas do material, mas são dependentes das condições de ensaio (diâmetro do penetrador e força máxima).

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- Dieter, G. E. “Mechanical Metallurgy”, 2. Ed., McGraw-Hill, 1976.
- Ferreira, F.M., 2010, “Avaliação Tribomecânica via Esclerometria Retilínea e Indentação Instrumentada do Aço ABNT 8550”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.
- Franco, S. D., 2007, “Avaliação de Propriedades Mecânicas In Situ Através de Macroindentação Instrumentada – Parte II”, Uberlândia: Laboratório de Tribologia e Materiais – FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia. Relatório.
- Haggag, F.M., Nanstad, R.K., Braski, D.N., 1989, “Structural Integrity Evaluation Based on an Innovative Field Indentation Macroprobe”, ASME Vol.170, Book No.H00485, pp.101-107.
- Kania, R., Russel, A., Gao, M., “Advanced Indentation Systems for Tensile Properties Evaluation of In-Service Pipelines”, NACE – Corrosion 2004, N° 04170, New Orleans, USA, 28 march – 01 april, 2004.
- 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 14° POSMEC/UFU, Uberlândia.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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