

Um modelo de molas múltiplas para ensaios de tração em máquinas eletro-mecânicas

Ney Freitas de Quadros
Francisco Ambrózio Filho
Iain Le May

Neste trabalho são revistos os métodos estático e dinâmico para o cálculo do módulo de rigidez (K_m) de uma máquina eletro-mecânica universal de tração. Desenvolve-se um modelo de várias molas em série (múltiplas) com a finalidade de calcular os vários módulos de rigidez que passam a existir quando a amostra apresenta mais de um módulo de elasticidade, como previsto pela teoria da multielasticidade quantizada de Bell. Mostra-se uma aplicação do modelo para um ensaio de tração em alumínio ultra-puro, comparando-o com o modelo das duas molas.

1. INTRODUÇÃO

Um dos ensaios mais simples da mecânica dos sólidos é a medição de uma força axial e da deformação que ela produz numa amostra. Mesmo assim, há praticamente dois séculos são escritos artigos com a finalidade de descrever a relação funcional entre a tensão uniaxial e a deformação longitudinal em ensaios quase-estáticos de tração, demonstrando a complexidade de sua natureza. O ensaio, em si, é realmente muito simples e, por isto, tem sido bastante usado para a obtenção de informações básicas sobre a resistência dos materiais e como um teste para o controle de especificações; além disto, é exatamente útil uma vez que pode fornecer consideráveis informações sobre o comportamento do material em serviço, sua resistência e sua ductilidade⁽¹⁻⁷⁾.

Em 1909 Ludwick⁽⁸⁾ realizou ensaios com um protótipo de máquina eletromecânica; no mesmo ano, André Le Chatelier⁽⁹⁾ descrevia descontinuidades nas curvas da carga em função da deformação em outra máquina do mesmo tipo. Só em 1912 Rosenhain & Archbutt⁽¹⁰⁾ realizaram ensaios definitivos em máquinas eletro-mecânicas com o barramento acionado por dois parafusos sem-fim. Estas máquinas foram fabricadas comercialmente a partir de 1920.

As características das máquinas de ensaios podem ter grande influência tanto na forma das curvas tensão-deformação como no comportamento do material durante a fratura⁽⁷⁻¹¹⁾. As máquinas eletro-mecânicas com transmissão por parafuso sem-fim são bastante rígidas (alta constante de mola) e são conhecidas como *duras*: nelas a deformação se dá pelo deslocamento a uma velocidade constante do travessão móvel. Não há controle nem da velocidade de deformação nem da velocidade de aplicação da carga, que variam com o tempo, com a geometria do corpo de prova, com a

natureza do material etc. este tipo de máquina reproduz fielmente os limites superior e inferior do escoamento⁽¹²⁻¹³⁾.

Um dos problemas fundamentais da análise das curvas tensão-deformação obtidas nesse tipo de máquina está relacionado com o registro da curva do ensaio, a qual é traçada num registrador que aciona o papel gráfico a uma velocidade constante, tendo por ordenada o tempo e por abscissa a carga. Como a velocidade do deslocamento do travessão móvel é constante, pode-se obter medida do alongamento do corpo de prova de uma maneira indireta, todavia precisa. Por outro lado, o sistema composto pelas garras, acoplamentos, célula de garra, parte do corpo-de-prova fora do comprimento útil etc., (que será chamado doravante de máquina) influi na medição do alongamento. Portanto, a curva autográfica contém uma interação elástica da máquina com a amostra. Existem modelos que permitem o cálculo do efeito da máquina e a sua subtração em cada ponto da curva registrada. Destes, o mais usado é o modelo das duas molas, que pode ser calculado de duas maneiras: uma estática e outra cinética ou dinâmica. Estes modelos exigem o conhecimento prévio do módulo de elasticidade longitudinal da amostra (módulo de Euler)^(1, 7, 11-17), e também que o módulo tangente (módulo aparente) seja linear.

O gráfico da carga em função do alongamento apresenta duas regiões bem distintas: a primeira, linear, é a região de deformação elástica; a segunda, com uma forma mais ou menos parabólica, é a região de deformação plástica. Para calcular o alongamento na região de deformação plástica é necessário subtrair-se o alongamento sofrido pela amostra na região de deformação elástica, após descontado o efeito da máquina (o que pode ser realizado com a ajuda do modelo das duas molas).

Usando-se uma aplicação adequada (1 000 x para o Al,

Ney Freitas de Quadros – Eng^o Industrial Metalúrgico (UR), M.C. (COPPE) e Dr. (IPEN/USP), IPEN-CNEN/SP.

Francisco Ambrózio Filho – Eng^o Metalúrgico, M.C. E Dr. (EPUSP) – Chefe da Divisão de Materiais Metálicos, IPEN-CNEN/SP.

Iain Le May – Eng^o, Ph. D., Prof. Universidade de Saskatchewan, Saskatoon, Canadá.

Contribuição Técnica nº 1982. Apresentada ao 40^o Congresso Anual de ABM; Rio de Janeiro RJ; Julho de 1985.

UFPA
Escola de Engenharia
BIBLIOTECA
Rua do Paschoa

400 x para o aço), nota-se facilmente que a região elástica apresenta várias regiões lineares e não apenas uma. Este fenômeno foi observado por J.F. Bell^(2, 3) em máquinas moles (de peso fixo ou de velocidade de aplicação de carga constante) e Quadros^(1, 18, 19) em máquinas duras. Bell postulou a existência da multielasticidade quantizada com base em suas observações. Segundo esta teoria, os materiais possuiriam vários módulos de elasticidade, os quais estariam ordenados segundo dois números discretos, s e p ($s = 1, 2, 3 \dots$ e $p = 0$ ou 1), e seriam dados pela equação:

$$E = 2.06.A. (3/2)^{s/2 + p/4} (1 + \nu) (1 - T/2 T_f)$$

onde:

$$E = 2.06.A (3/2)$$

$$A = \text{constante universal} = 2.86 \times 10^4 \text{ (kg/mm}^2\text{)} = 28.34 \times 10^4 \text{ MPa;}$$

ν = razão de Poisson;

T = temperatura do ensaio (K);

T_f = temperatura de fusão em K (ou da linha solidus da liga).

Todos os ensaios realizados pelo autor desde 1976, apresentaram mais de uma reta na região de deformação elástica, facilmente visíveis sempre que forem usadas ampliações adequadas. Tornou-se claro, desde então, que o modelo ds duas molas não poderia mais ser aplicado.

O objetivo deste trabalho é mostrar o desenvolvimento de um modelo que permita separar o efeito da máquina na interação máquina + amostra em ensaios de tração em máquinas duras. A revisão inclui dois métodos de cálculo do modelo das duas molas.

2. REVISÃO

A figura 1 mostra esquematicamente uma máquina de ensaios de tração do tipo dura, (a), e o modelo das duas molas (b). A amostra é representada pela mola menor. Esta, quando em repouso, possui um comprimento útil igual a L_0 , igual ao comprimento padrão do corpo-de-prova. Sua resistência à solitação em tração é exatamente igual à da amostra. A outra mola, mais acima, em série com a primeira, re-

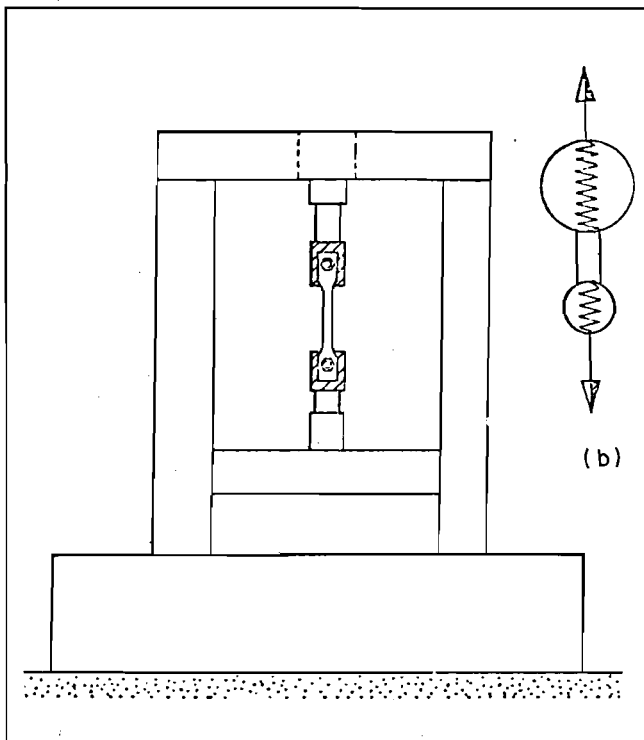


Fig. 1 - a) Esquema de uma máquina universal de ensaios do tipo dura;
b) Esquema de modelo das duas molas. A mola maior representa a máquina

presenta a máquina como um todo, incluindo: a parte da amostra fora do comprimento padrão; todos os sistemas de ligação da amostra com as garras; deflexão da célula de carga; deflexão do pórtico de carga e as folgas e deslizamentos que porventura ocorram.

A figura 2 mostra o gráfico obtido na carta registradora. Geralmente no início da região elástica, observa-se um desvio convexo devido ao efeito da acomodação das garras. Logo após verifica-se uma região linear (dependendo da ampliação usada) formando um ângulo com o eixo do alongamento (que é proporcional ao tempo).

- Método estático.

De acordo com a mecânica newtoniana, deve-se ter na parte linear da curva:

$$F = K \cdot L = K_m \cdot L_m = K_t \cdot L_t \quad (1), \text{ onde:}$$

K = constante de mola da amostra;

L = deslocamento devido ao alongamento sofrido pela amostra;

K_m = constante de mola da máquina;

L_m = deslocamento da máquina;

K_t = constante de mola do sistema (máquina + amostra);

L_t = deslocamento do sistema, medido na carta.

O deslocamento do sistema é a soma do deslocamento da máquina e do deslocamento da amostra.

$$L_t = L_m + L \quad (2)$$

Portanto,

$$1/K_t = 1/K_m + 1/K \quad (3)$$

Supondo que o material segue a lei de Hooke⁽²⁰⁾, obtém-se:

$$K = E \cdot A_0/L_0 \quad (4)$$

que é a expressão para a constante de mola da amostra. Substituindo na equação (3) e rearrumando, vem:

$$K_m = 1/(1/K_t - L_0/E \cdot A_0) \quad (5), \text{ ou}$$

$$K_m = \frac{1}{(\cot \theta - L_0/E \cdot A_0)} \quad (6), \text{ onde:}$$

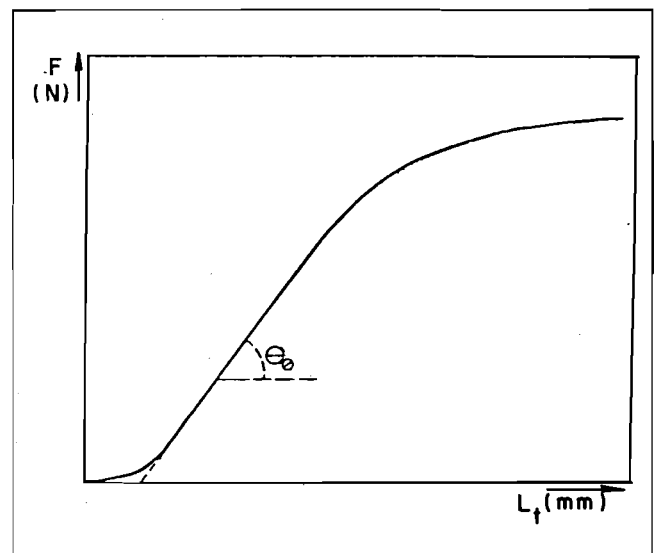


Fig. 2 - Gráfico obtido numa máquina tipo dura. Note-se o desvio inicial; é a inclinação da região linear

θ = ângulo formado entre a carga e o deslocamento total.
A tangente é obtida por regressão linear.

Usando-se as equações (1) e (2), vem:

$$\begin{aligned} F &= K_m (L_t - L), \text{ ou} \\ L &= L_t - F/K_m, \text{ e} \\ e_t &= (L_t - F/K_m) / L_0 \end{aligned} \quad (7), \text{ onde:}$$

e_t = deformação total nominal.

Uma vez calculado e_t , procede-se de modo normal para obter os outros parâmetros para a análise da região elasto-plástica.

- Métodos dinâmicos

O outro método de cálculo usa um conceito dinâmico, isto é, desenvolve o modelo colocando as variáveis em função do tempo^(1, 13, 15-17, 21-31). Existem pelo menos três maneiras de atacar o problema deste ponto de vista dinâmico: dois deles estão envolvidos com ensaios de relaxação de tensões; o terceiro, devido a Clough⁽¹⁷⁾, será resumido a seguir.

A equação constitutiva que governa o comportamento elástico da amostra, supondo válida a lei de Hooke, pode ser descrita:

$$\dot{S} = E \cdot \dot{e} \quad (8), \text{ onde:}$$

\dot{S} = Velocidade de aplicação da tensão (ou de carga);
 \dot{e} = Velocidade de deformação total ou elástica.

Supondo que após certo tempo decorrido do início do ensaio a máquina tem suas interfaces devidamente apertadas e que seus componentes estejam devidamente alinhados – de tal maneira que dentro da resolução do sistema de medidas se tenha a rigidez do sistema aproximadamente constante – pode-se aceitar a equação (2) como válida. Derivando-a em relação ao tempo:

$$dL_t/dt = dL_m/dt = dL/dt, \text{ ou}$$

$$dL_t/dt = dL_m/dF \cdot dF/dt = dL/dt, \text{ ou ainda}$$

$$V = (1/K_m) \cdot A_0 \cdot \dot{S} + L_0 \cdot \dot{e}_t \quad (9) \text{ onde:}$$

V = dL_t/dt = velocidade da ponte móvel;

K_m = dF/dL_m – Rigidez da máquina;

\dot{S} = $dF/dt \cdot 1/A_2$ = velocidade de aplicação de tensão (carga);

\dot{e}_t = $dL/dt \cdot 1/L_0$ = velocidade de deformação elástica (ou total).

A equação (9) é a equação básica da interação entre a amostra e a máquina do ponto de vista dinâmico.

Desprezando a diferença entre valores reais e nominais tanto para a tensão quanto para a deformação, vem:

$$\dot{S} = K_m \cdot V/A_0 - K_m \cdot L_0 \cdot \dot{e}_t/A_0 \quad (10)$$

A figura 3 mostra esquematicamente: (a) a curva da tensão em função da velocidade de deformação total e (b) a velocidade de aplicação de tensão versus a velocidade de deformação nominal.

O ponto I na figura 3 (b) corresponde ao ponto de inflexão na curva da fig. 3 (a) e seria o limite elástico ou o limite proporcional. Combinando-se a equação (10) com a equação (8), obtém-se o valor de S_I , que será o valor máximo da função no seu campo de existência:

$$\dot{S}_{\text{máx}} = \frac{K_m \cdot V \cdot E}{A_0 \cdot E + L_0 \cdot K_m} \quad (11), \text{ ou, de (10),}$$

$$K_m = \frac{A_0}{\frac{V}{\dot{S}_{\text{máx}}} - \frac{L_0}{E}} \quad (12)$$

Observando novamente a figura 3 (b), nota-se que a extrapolação da reta que passa pelos pontos b e I, para $\dot{e}_t = 0$, fornece:

$$K_m = \frac{\dot{S}_0 \cdot A_0}{V} \quad (13)$$

Derivando-se \dot{S} em relação a \dot{e}_t na equação (10), vem:

$$\frac{d\dot{S}}{d\dot{e}_t} = \frac{K_m \cdot L_0}{A_0} \quad (14)$$

Esta equação pode ser obtida facilmente por meio de uma regressão linear, a qual explicitará o valor da tangente ($m = -d\dot{S}/d\dot{e}_t$). Então:

$$K_m = \frac{mA_0}{L_0} \quad (15)$$

que é a equação da máquina (elastoplástica).

No ponto b da fig. 3 (b), onde $\dot{S} = 0$, vem:

$$\dot{e}_t = \frac{V}{L_0} \quad (16)$$

O método dinâmico desenvolvido por Clough permite o cálculo de K_m de uma maneira bastante simples. Atualmente, com o uso generalizado de computadores, torna-se fácil o cálculo das derivadas e dos parâmetros pertinentes a este método.

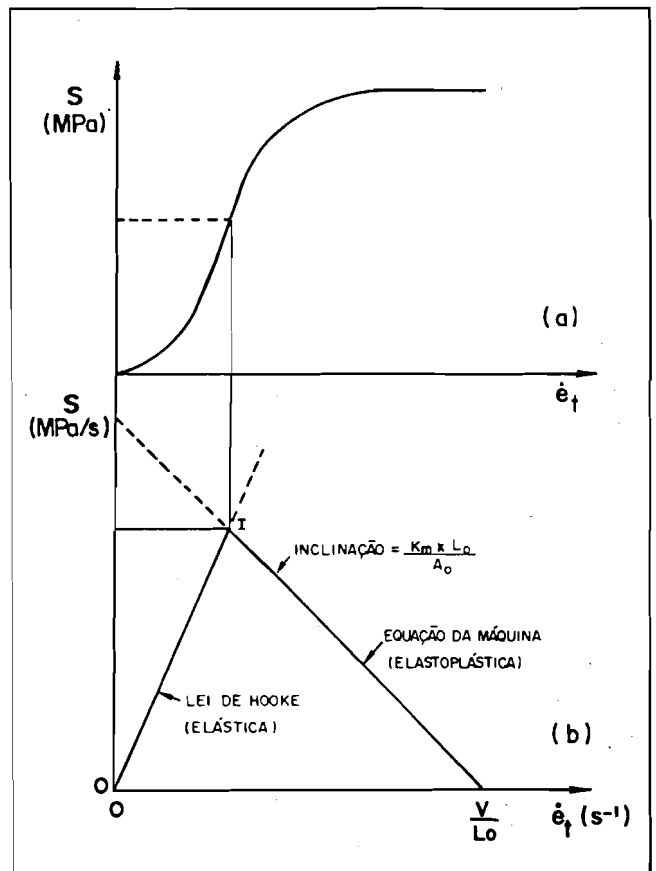


Fig. 3 - Modelo de Clough⁽¹⁷⁾: a) Curva geralmente obtida; b) Resultado da Aplicação das derivações. In Ref. (17), p. 22

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Usaram-se corpos-de-prova de Al ultra puro (99 995 Al), cuja composição é dada em outro trabalho⁽¹⁾, assim como a obtenção e tratamentos térmicos.

O material foi recozido 2 horas a 450°C e resfriado no forno por 24 horas. Os corpos-de-prova usados foram as amostras reduzidas segundo as normas ASTM-E-8.

Outros detalhes podem ser obtidos na referência (1).

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, 100, 200 e 300°C, às velocidades de deslocamento da ponte móvel de 0,5, 0,05 e 0,005 mm/min.

Em particular, o ensaio apresentado neste trabalho (PPO5) foi realizado a 200°C e 0,5 mm/min.

4. ANÁLISE DAS CURVAS VERSUS TEMPO

Como citado na introdução, foi usada uma ampliação adequada para o Al (no caso, 1 000 x). Os ensaios (todos) sempre apresentaram mais de uma reta na região linear. Uma das maneiras mais simples de verificar a existência destas retas é fixar o papel sobre um plano e examinar o gráfico com a vista quase paralela a este plano.

Usou-se um método estatístico para o exame da região linear (1) baseada na análise dos resíduos. Segundo este método, se a regressão linear representa realmente uma função entre a variável independente e a variável dependente, o gráfico dos resíduos (resíduo = valor calculado - valor experimental) em função da variável independente deve apresentar valores aleatórios em relação a uma reta traçada perpendicularmente à ordenada de resíduo nulo. Caso os resíduos apresentem alguma tendência, a equação não representa a realidade. Há que fazer outra regressão⁽³²⁻³⁴⁾.

No caso presente, após fazer um gráfico ampliado (terminal gráfico), traçavam-se as retas aproximadamente. Eram feitas regressões lineares exploratórias num mini-computador, e assim definiam-se os limites das retas presentes. Por fim, faziam-se os gráficos dos resíduos para todo o trecho analisado e para cada reta do trecho. Quando os resíduos apareciam de um modo aleatório tinha-se definido uma reta. Aplicando este método sucessivamente foram obtidas as retas que compunham a região elástica⁽¹⁾. Estas retas eram então lançadas no programa de análise das curvas tensão-deformação. Uma vez rodado o programa, dispunha-se de um terminal gráfico com um programa interativo que permitia analisar as curvas trecho a trecho.

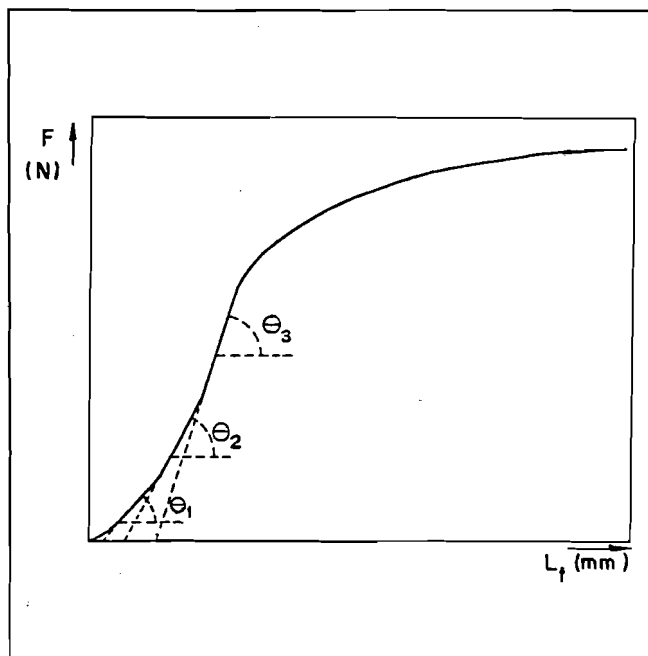


Fig. 4 - Esquema de um ensaio realizado com ampliação adequada. Aparecem em três segmentos lineares na região elástica

5. O MODELO DAS MOLAS MÚLTIPLAS

A figura 4 apresenta um gráfico esquematizado de carga contra o deslocamento com três retas na região elástica. Para cada reta existe um K_m . No modelo presente, a cada módulo de elasticidade corresponde um K_m ; a recíproca não é verdadeira, pois, em certos casos, poderão ocorrer mais de uma reta num trecho onde o módulo dominante é o mesmo. Isto é fácil de verificar pois, geralmente, os módulos elásticos caminham do maior para o menor, e, no caso do Al, o módulo de Euler anterior é *sempre* maior que o que lhe segue.

O ideal seria que a cada mola M_i correspondesse uma mola A_i da amostra. Todavia, principalmente no início do ensaio, ocorrem ajustes e, eventualmente, escorregamento do sistema corpo-de-prova máquina, especialmente nas garras, podendo dar origem a duas ou três molas M_i correspondendo a apenas uma mola A_i (cuja constante de mola K_i é proporcional ao módulo de elasticidade do material).

Operacionalmente, podem-se definir as seguintes equações:

$$F_i = K_{ti} \cdot L_{ti} = K_{mi} \cdot L_{mi} = K_j \cdot L_j \quad (16), \text{ onde,}$$

$$j \leq i.$$

$$\sum_{i=1}^j L_{ti} = \sum_{i=1}^j L_{mi} + \sum_{i=1}^j L_j \quad (17), \text{ e,}$$

finalmente:

$$K_{mj} = \frac{1}{\cot \theta_j - E_j \frac{L_o}{A_o}}$$

6. APLICAÇÃO

A figura 5 mostra a aplicação deste modelo a um ensaio de tração realizado a 200°C e 0,5 mm/min. A região elástica apresentou três retas. O gráfico mostra claramente os módulos de elasticidade correspondentes. Na região elastoplástica, obtém-se uma reta como previsto por Clough⁽¹⁷⁾, a não

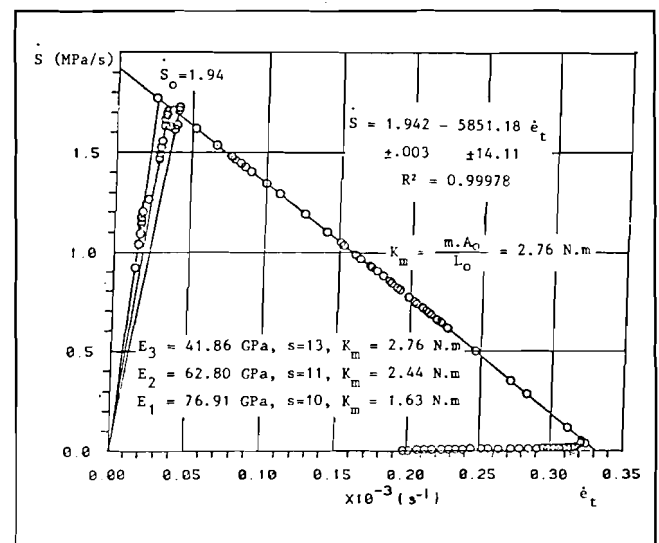


Fig. 5 - Aplicação do modelo de molas múltiplas a um ensaio realizado a 200°C e 0,5 mm/min. O maior módulo (E_1) é o que está mais perto de eixo das ordenadas. A regressão foi aplicada entre os pontos 34 e 78.

ser por um ou por outro ponto que provavelmente, por causa das derivações numéricas, escapam um pouco à previsão dele.

A figura 6 mostra o gráfico para o caso em que não fosse levado em conta a presença das três retas, isto é, o modelo clássico das duas molas.

A curva da carga em função de deslocamento para o ensaio PPO5 é semelhante à esquematizada na figura 4.

As regressões das regiões elastoplásticas foram realizadas sobre os mesmos pontos nas figuras 5 e 6 (do ponto 34 ao 78). A região elástica compreende os 33 primeiros pontos. Note-se que a diferença entre o K_m do modelo clássico e do modelo das molas múltiplas é de 18%, enquanto entre os modelos que atuam na região plástica é de 34%.

Estas observações conduzem ao critério estatístico que norteou esta parte do trabalho:

1. Deve-se analisar toda a região de deformação elástica por regressões lineares simples;
2. Devido à precisão empregada nas medidas, o coeficiente de correlação deve ser bastante próximo de 1 (em geral da ordem de 0.999);
3. A análise dos resíduos deve confirmar o comportamento aleatório destes, ou seja, o gráfico dos resíduos em função da variável independente não deve apresentar tendência alguma;
4. Cada trecho da região elástica da curva $F \times t$ que satisfizer as condições 2 e 3 será considerado como uma reta cuja tangente é o módulo aparente. Para cada trecho são válidas as relações existentes no modelo das duas molas.

Suponha-se que tanto a máquina quanto a amostra podem ser representadas por várias molas; chamando de M_i as molas que representam a máquina e de A as molas que representam a amostra, podem ser estabelecidas as seguintes condições de contorno:

1. Condições de contorno para as molas que representam a máquina (M_i):
 - Cada mola possui um intervalo de existência bem definido por uma relação linear entre a carga e o deslocamento da máquina;
 - O critério para a determinação do(s) segmento(s) linear(es) deve ser construído em bases puramente estatísticas (como adotado neste trabalho);
 - Após operar no seu intervalo de existência (segmento linear) a mola passa a funcionar como um corpo idealmente rígido para o sistema.
2. Condições de contorno para as molas que representam a amostra (A):
 - Os módulos de elasticidade são dados pela equação de Bell;
 - O intervalo de existência de cada módulo (ou mola) deve ser determinado de acordo com o comportamento elástico de cada material;

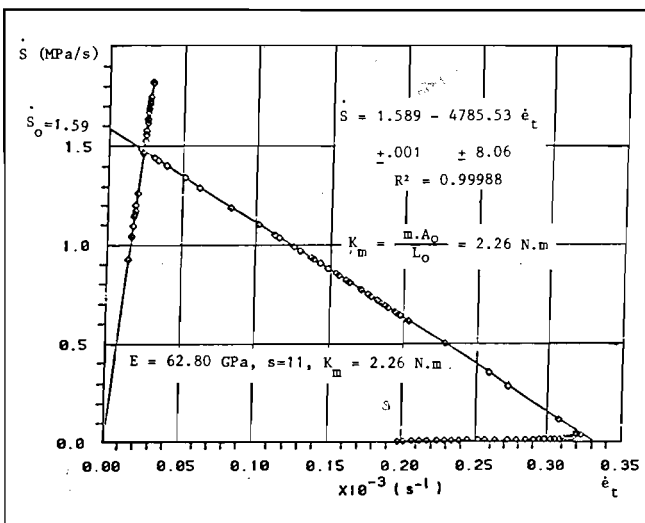


Fig. 6 - Aplicação do modelo clássico, mostrando a discrepância entre este e o modelo desenvolvido por Clough⁽¹⁷⁾.

- Após operar no seu intervalo de existência a mola passa a funcionar como um corpo idealmente rígido para o sistema.

A aplicação do modelo clássico (figura 6) apresenta uma região com cerca de 20 pontos na continuação da reta do módulo elástico que não está de acordo com o método de Clough. No seu trabalho (17) Clough mostra um resultado experimental que pode estar de acordo com o novo modelo, uma vez que suas derivadas foram obtidas eletronicamente.

7. CONCLUSÕES

1. Desenvolveu-se um modelo de molas múltiplas para o cálculo das constantes de mola da máquina correspondentes a cada módulo de elasticidade do material.
2. A aplicação do modelo mostrou que ele é compatível com o método dinâmico desenvolvido por Clough⁽¹⁷⁾.
3. Demonstrou-se que o modelo das duas molas pode levar a grandes erros no cálculo da constante de mola da máquina.

BIBLIOGRAFIA

1. QUADROS, N.F. - *Aspectos da Deformação do Alumínio em Ensaios de Tração*. Tese de Doutorado, IPEN/USP, São Paulo (1985).
2. BELL, J.F. - *The Experimental Foundations of Solid Mechanics* - S. Flüge, Chief, Ed., C.A. Truesdell, Ed., Band VI a/1, Springer-Verlag, Berlin - Heilidelberg - New York, (1973).
3. BELL, J.F. - *The Physics of Large Deformation of Crystalline Solids*, Springer Tracts in Natural Philosophy, 14, Springer-Verlag, Berlin - Heilidelberg - New York, (1968).
4. LE MAY, I. - *Principles of Mechanical Metallurgy*, Elsevier, North-Holland, Inc., New York, (1981).
5. DIETTER, G.E. - *Metalurgia Mecânica*, Tradução, 2ª Ed., E. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, (1981).
6. MEYERS, M.A. & CHAWLA, K.K. - *Princípios de Metalurgia Mecânica*, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, (1982).
7. TEGART, W.J.M. - *Elemento of Mechanical Metallurgy*, Mac-Millan New York, (1966).
8. LUDWICK, P. - *Physikalische Zeitschrift*, 10 (1909); 411-417.
9. LE CHATELIER, A. - *Rev. Metall.*, 6 (1909); 914-917.
10. ROSENHAIN, W. & ARCHBUTT, S.L. - *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, (1972); 313-315.
11. AVERY, D.H. & FINDLAY, W.N. - in *Techniques of Metals Research*, vol. 5, Part I, R.F. Bunshah, Ed., Interscience, New York, (1971), 91-143.
12. QUADROS, N.F. - *Evidência da Fragilidade do Revenido Reversível no Aço AISI 4340*, Tese de Mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, (1971), p. 19.
13. MIRANDA, P.E.V. - *Sobre o efeito do Sistema Deformativo e das Alterações Subestruturais na Reflexão de Tensões no Titânio*, Tese de Mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, (1979); 10-12; 76-81.
14. GUIMARÃES, J.R.C. & CHAWLA, K.K. - *Metalurgia-ABM*, 34 (1978); 549-552.
15. HART, E.W. - *Acta Metall.*, 15 (1967); 351-355.
16. FORTES, M.A. & PROENÇA, J.G. - *J. Test. Eval.*, 4 (1978); 248-250.
17. CLOUGH, R.B. - in *Recent Development in Mechanical Testing*, ASTM STP 608, (1976); 20-44.
18. QUADROS, N.F. - *Metalurgia-ABM*, 36 (1980); 765-771.
19. QUADROS, N.F. - *Anais do 5º CBECIMAT*, Porto Alegre, RS, (1982); 795-804.
20. HOOKE, R. - *John Martin*, London (1678). Reprinted in *Early Science in Oxford*, R.T. Gunther, Ed., Oxford, Vol. VIII (1931); 331-356.
21. NOBLE, F.W. & HULL, D. - *Acta Metall.*, 3 (1955); 1089-1092.
22. MECKING, H. & LUCKE, K. - *Mater. Sci. Eng.*, 1 (1967); 349-359.
23. GUIU, F. & PRATT, P.L. - *Phys. Stat. Sol. B*, 6 (1964); 111-120.
24. LLOYD, D.S. & EMBURY, J.D. - *Phys. Stat. Sol. B*, 43 (1971); 393-399.
25. ROHDE, R.W. & NORDSTROM, T.V. - *Mater. Sci. Eng.*, 12 (1973); 179-195.
26. GILLES, P.P. & MEDRANO, L.E. - *J. Mater.*, 6 (1971); 514-523.
27. CHRIST, B.W. & PICKESIMER, M.L. - *Acta Metall.*, 22 (1974); 435-447.
28. VAN DER BRINK, S.H. et al. - *Phys. Stat. Sol. A*, 41 (1977); 513-521.
29. LEE, D. & HART, E.W. - *Metall. Trans.*, 2 (1971); 1245-1248.
30. CORREIA, M.T. & FORTES, M.A. - *Scripta Metall.*, 15 (1981); 369-372.
31. IBIDEM, *J. Test. Eval.*, 10 (1982); 269-272.
32. CARVALHO, J.F. - *Comunicação pessoal*, (1984).
33. CARVALHO, J.F. & DACHS, J.N.W. - *Regressão*, Ed. UFSCAR, em preparação.
34. DRAPER, N. & SMITH, H. - *Applied Regression Analysis*, Second Edition, John Wiley & Sons, New York, (1981); 141-176.