

IDENTIFICAÇÃO DE CARGAS AXIAIS EM DUTOS TUBULARES

M. Sc. Sigeo Kitatani Júnior, LMEst/MFLab, sigeo@mecanica.ufu.br
Prof. Dr. Domingos Alves Rade, LMEst, domingos@ufu.br

Resumo. Para se investigar o comportamento dinâmico de estruturas como prédios, pontes, dutos, em condições reais de serviço, requer a identificação das condições de carregamento a que estão submetidas. Na maioria dos casos, a medição das forças envolvidas não pode ser medidas de forma direta, sendo necessário uma metodologia baseada na solução de problemas de otimização. Neste trabalho é apresentada uma proposta para identificação da força externa aplicada a uma estrutura tubular através da solução do problema inverso, em que as respostas em frequência da estrutura são tidas como dados de entrada para o problema de otimização. O intuito é estender a metodologia para a solução de problemas associados a dutos de extração de gás natural da indústria petrolífera.

Palavras chave: Viga Euler-Bernoulli, Elementos Finitos, problema inverso, força-axial.

1. INTRODUÇÃO

O fato de que as solicitações externas podem modificar o comportamento dinâmico de uma estrutura é bem conhecido, sendo denominado enrijecimento por tensões (*stress-stiffening*), segundo Greening e Lieven (1999). Pode-se identificar este efeito nos instrumentos musicais de corda, nos quais as notas (as frequências naturais de vibração) são ajustadas variando-se o nível de tensão nas cordas do instrumento. Este efeito ocorre igualmente em elementos estruturais, tais como barras, vigas, placas, cascas, conforme evidenciado por Lurie (1952) e, mais recentemente, no livro de Virgin (2007).

Ao ser necessário caracterizar as condições estruturais (estado de tensão e de deformação) e de vibração de estruturas como pontes, torres, prédios e dutos em funcionamento, requer o conhecimento dos carregamentos a que elas estão submetidas. Nesta situação, em que estas forças são desconhecidas e não podem ser medidas diretamente, um procedimento inverso é necessário para identificar os esforços sobre a estrutura. Tendo em vista esta problemática, o presente trabalho foi ensejado a partir de um projeto de pesquisa com a empresa PETROBRAS. Envolve a proposição de uma metodologia de identificação da carga axial a que um trecho de gasoduto (submerso em ambiente marinho) é submetido.

A metodologia é baseada na solução de um problema inverso em que se deseja identificar a magnitude da força axial, a partir da resposta dinâmica da estrutura. Para tal, é feita a modelagem numérica da estrutura, pelo Método dos Elementos Finitos, acoplado a um algoritmo evolutivo de otimização, denominado *Evolução Diferencial*. Como dados de entrada para a resolução do problema inverso são utilizadas as frequências naturais obtidas experimentalmente. Estas frequências são obtidas em ensaios de laboratório, através da aplicação da técnica de Análise Modal Experimental, a partir de um modelo experimental construído a partir de correlações geométricas com o tubo real instalado em leito marinho.

A seguir são apresentadas as metodologias utilizadas para a resolução do problema inverso. Subsequentemente, são apresentados os resultados preliminares da identificação da carga axial.

2. METODOLOGIA

2.1. Modelagem Estrutural

Para a modelagem numérica da estrutura, por elementos finitos, considere a estrutura tubular de seção circular, com comprimento L , raio externo r_e e espessura de parede e , mostrada na Fig. 1, submetida a ação de carregamentos na direção transversal, $q(x,t)$, e na direção axial, $N(x)$. Admitindo que o comprimento da estrutura é muito maior que o seu diâmetro e opera no domínio de baixas frequências, a estrutura pode ser modelada como uma viga do tipo Euler-Bernoulli.

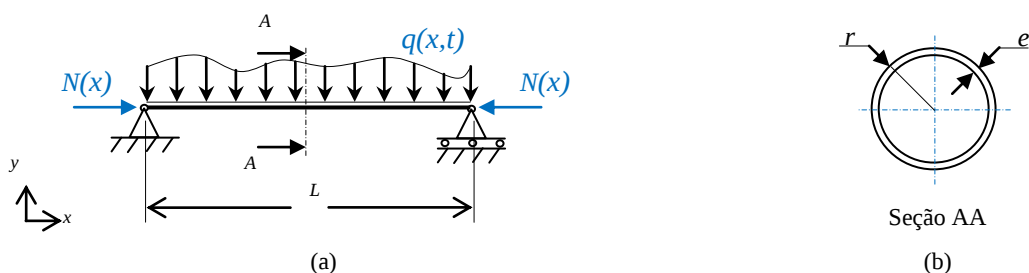


Figura 1. Viga Euler-Bernoulli: (a) Representação da estrutura; (b) Seção transversal da viga.

A viga do tipo Euler-Bernoulli pode ser discretizada pelo método dos elementos finitos, a partir de um elemento genérico de viga, contendo dois nós e três graus de liberdade por nó, um de translação, na direção transversal (v_i), e outro de rotação da seção transversal (θ_i).

Devido ao fato de que os deslocamentos longitudinais são independentes dos demais e sabendo que as rotações e os deslocamentos transversais relacionam-se segundo $\theta_i(x,t) = \frac{\partial v_i(x,t)}{\partial x}$, pode-se analisar separadamente o movimento longitudinal e o movimento transversal.

A obtenção das equações diferenciais do movimento da viga, tanto na direção transversal, quanto longitudinal, se dá empregando-se as equações de Lagrange do movimento:

$$\frac{\partial L_i^f}{\partial \{\delta_i(t)\}} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_i^f}{\partial \{\dot{\delta}_i(t)\}} \right) = 0, \quad (1)$$

em que $L_i^f = T_i^f - V_i^f$ é o Lagrangeano, T a energia cinética e V a energia potencial do elemento de viga, modeladas segundo Craig e Kurdila (2006).

A Eq. (1) pode ser escrita na forma matricial:

$$[M]\{\ddot{U}_i(t)\} + [K]\{\dot{U}_i(t)\} = \{P_i(t)\}, \quad (2)$$

em que M representa a equação da massa da estrutura, K a matriz de rigidez, P a força externa à viga. Nota-se neste modelo, que a matriz de rigidez é obtida através da soma de duas parcelas:

$$[K] = [K^E] + [K^G],$$

em que:

$$[K_i^E] = \frac{E_i I_i}{l_i^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_i & -12 & 6l_i \\ & 4l_i^2 & -6l_i & 2l_i^2 \\ & & 12 & -6l_i \\ sim. & & & 4l_i^2 \end{bmatrix}, [K_i^G] = \frac{N_i}{l_i} \begin{bmatrix} \frac{6}{5} & \frac{l_i}{10} & \frac{6}{5} & \frac{l_i}{10} \\ & \frac{2l_i^2}{15} & -\frac{l_i}{10} & -\frac{l_i^2}{30} \\ & & \frac{6}{5} & -\frac{l_i}{10} \\ sim. & & & \frac{2l_i^2}{15} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Observe-se que $[K^E]$ é a **matriz de rigidez dita estrutural** e $[K^G]$ é a **chamada matriz de rigidez geométrica**, sendo esta última associada à influência do carregamento axial sobre a rigidez à flexão, representando, portanto, o efeito do enrijecimento por tensões.

2.2. Procedimento inverso de identificação

O procedimento inverso proposto faz uso de um algoritmo de otimização denominado Evolução Diferencial (ED). A Evolução Diferencial (ED) é um AE proposto por Storn e Price (1995) para problemas de otimização. Na evolução diferencial, o valor de cada variável é representado por um valor real (ponto flutuante) e o procedimento de otimização segue as seguintes etapas:

- Gerar uma população inicial, com distribuição de probabilidade uniforme, de soluções factíveis à solução do problema em questão, o que é garantido por regras do tipo “regras de reparo” que garantem que os valores atribuídos às variáveis estão dentro das fronteiras delimitadas pelo projetista;
- Um indivíduo é selecionado, de forma aleatória, para ser substituído e três diferentes indivíduos são selecionados como genitores (pais);
- Um destes três indivíduos é selecionado como genitor principal;
- Com alguma probabilidade, cada variável do genitor principal é modificada. Entretanto, no mínimo uma variável deve ter seu valor alterado;
- A modificação é realizada pela adição do valor atual da variável de uma taxa da diferença entre dois valores desta variável nos dois outros genitores. Em outras palavras, o vetor denominado genitor principal é modificado

baseado no vetor de variáveis de dois outros genitores. Este procedimento representa o operador de cruzamento na evolução diferencial;

- Se o vetor resultante apresenta uma função de aptidão melhor que o escolhido à substituição, ele o substitui; caso contrário, o vetor escolhido para ser substituído é mantido na população.

A resolução do problema inverso se dá pela formulação do problema de otimização:

$$\min_{\{p\}} J = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left| \omega_i^{(e)} - \omega_i^{(m)}(\{p\}) \right|, \quad (4)$$

em que J é a função objetivo a ser minimizada $\omega_i^{(e)}, i = 1, 2, \dots, n$ são as frequências naturais obtidas a partir de dados vibratórios experimentais $\omega_i^{(m)}(\{p\}), i = 1, 2, \dots, n$ são as frequências naturais obtidas a partir do modelo de elementos finitos e $\{p\}$ é o valor da carga axial (P). Nos casos em que mais de um fator deve ser levado em consideração, p será um vetor que contém os valores de parâmetros do modelo, cujos valores influem no problema e devem ser identificados.

2.3. Modelagem experimental

O modelo experimental é composto de um tubo de inox, de diâmetro nominal de 1 polegada e Schedule 05, cujos dados são apresentados na Tab. 1. As extremidades do tubo são modificadas, a fim de possibilitar as condições de vinculação: engastada e vinculada. Este tubo é montado em suportes, que por sua vez estão montados sob um perfil estrutural de alumínio, como mostrado na Fig. 2.

Tabela 1. Dados do tubo utilizado para construção da viga experimental.

Raio externo (m)	Espessura (m)	Comprimento (m)	Densidade (Kg/m ³)	Módulo de elasticidade (N/m ²)	Massa (Kg/m)
$1,37 \times 10^{-1}$	$1,59 \times 10^{-2}$	10	7,86	$2,1 \times 10^{11}$	1,06

Para a execução da análise modal experimental, foram utilizadas duas metodologias. A metodologia convencional, em que, a partir da correlação entre o sinal de força utilizada para excitar a estrutura e o sinal de aceleração resultante, obtém-se as respostas do sistema, no domínio da frequência – as FRFs. A segunda metodologia é denominada Operational Modal Analysis (OMA), muito utilizada em situações em que não se consegue induzir vibração no sistema a ser caracterizado, como em análises dinâmicas em pontes, prédios. Nestes casos utiliza-se a excitação natural da estrutura para a realização da análise modal experimental. O sinal da força é suprimido, fazendo-se uma análise de transmissibilidade de vibração, adicionando-se um dado de aceleração de referência, no lugar do sinal da força.

Para os ensaios experimentais a estrutura foi discretizada em sete pontos, 6 de medições, e um de referência. Para o caso da análise modal convencional, nos pontos de medição são feitos impactos com martelo instrumentados com célula de carga, e, no ponto de referência, captura-se a resposta da estrutura – o sinal de aceleração. Já para o caso do OMA, são feitas medidas de aceleração, em todos os pontos, como esquematizado na Fig. (3).

2. RESULTADOS E CONCLUSÕES

A Tab. (2) mostra a comparação entre os resultados encontrados para a modelagem experimental, utilizando a metodologia convencional e a metodologia OMA, bem como os resultados para a modelagem utilizando elementos finitos. É possível notar a partir destes resultados que há boa concordância entre os resultados encontrados para as duas metodologias de análise modal experimental, que por sua vez, são próximos aos resultados obtidos numericamente, a partir do modelo de elementos finitos.

A partir das frequências experimentais obtidas para as cargas de 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 Newtons, foi resolvido o problema de otimização. Os resultados do processo de identificação da carga, para a viga bi-engastada e bi-apoiada, são mostrados na Tab (2).

Vê-se pelos resultados apresentados na Tab. (2) que a carga otimizada, encontrada a partir do procedimento inverso, para a viga na condição engastada é bem próxima dos valores utilizados no experimento. Entretanto, nota-se pelos resultados apresentados para a viga na condição bi-rotulada, que a rótula não é ideal; além, disso, pode-se notar uma correlação entre a carga axial aplicada e o atrito na rótula, o que causa um enrijecimento da viga.

Conclui-se a partir destes resultados que a técnica de identificação se mostra adequada para a identificação da carga axial, porém deve-se utilizar um procedimento de otimização multi-objetivo, a fim de modelar com mais fidelidade outros parâmetros que variam no experimento, e que não estão sendo levados em consideração até o momento.

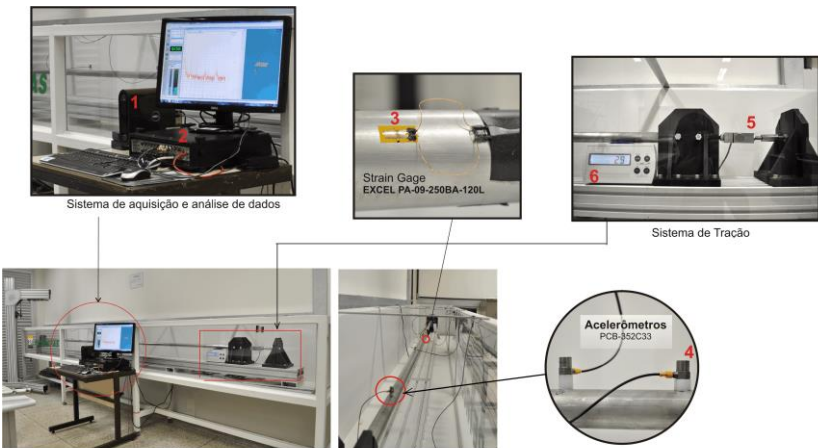


Figura 2. Bancada experimental com indicações aos detalhes da instrumentação: (1) Computador para controle do sistema de aquisição, armazenamento e pós-processamentos dos dados experimentais; (2) Plataforma Pulse®, da Bruel&Kjaer para aquisição de dados dos acelerômetros, operada por computador; (3) Strain gage para monitoramento de nível de tensão no tubo; (4) Acelerômetros; (5) Célula de carga HBM-1ton; (6) Indicador da célula de carga.

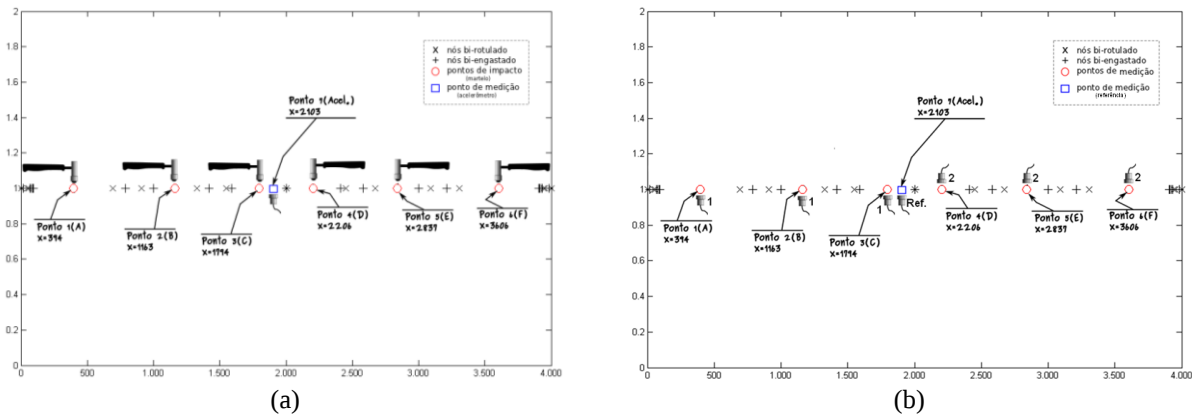


Figura 3. Instrumentação para análise modal experimental: (a) metodologia convencional; (b) metodologia OMA.

Tabela 2. Resultados encontrado para o procedimento de análise modal experimental e de otimização.

	Resultado esperado	Resposta	Diferença (%)		Resultado esperado	Resposta	Diferença (%)
ENGASTADA	1000	944,04	6	ROTULADA	1000	ND	ND
	2000	2631,5	24		2000	1995,4	0
	3000	3615,2	17		3000	3145,1	5
	4000	4624,5	14		4000	4372	9
	5000	5438,4	8		5000	5638	13

3. REFERÊNCIAS

BAHRA, A. S., GREENING, P. D. Identifying axial load patterns using space frame FEMs and measured vibration data. Mechanical Systems and Signal, Vol. 23, pp. 1282-1297. 2009.

FLORES, J. E. Rojas. Caracterização do efeito de enrijecimento por tensões e identificação de cargas em estruturas baseada em respostas dinâmicas. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2004.

FRISWELL, M. I. MOTTERSHEAD, J. E.; Finite Element Model Updating in Structural Dynamics; Kluwer; Dordrecht; 1995.

VIANA, F. A. C., KOTINDA, G. I ; RADE, D. A., STEFFEN JR., V. Identification of External Forces in Mechanical Systems by Using LifeCycle Model and Stress-Stiffening Effect. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 21, p. 2900-2917, 2007.