

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Redução de Vibrações através do uso de Materiais Viscoelásticos

AUTORES:

Flávia Carolina Leite Borges¹, Ney Roitman¹, Carlos Magluta¹, Daniel Alves Castello², Ricardo Franciss³

INSTITUIÇÃO:

¹Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, ²Departamento de Engenharia Mecânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, ³CENPES/Petrobras, Rio de Janeiro

REDUÇÃO DE VIBRAÇÕES ATRAVÉS DO USO DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

Abstract

The increasing need for petroleum is leading to an exploration in deep water, leading the structures to have a complex behavior. One of the main components in this area is the riser-like structure. They are usually arranged in catenaries and carry the oil or gas from the wells to the platforms. These structures are submitted to dynamic loads such as the ones which are induced by the detachment of vortices when the structure is submitted to sea currents. These loads may reduce their lifetime due to fatigue.

The increase of operational lifetime of any structure is a constant pursue for different engineering fields. In particular, concerning riser-like structures lifetime it should be emphasized its economic consequences as well as the environmental ones such as ecological disasters related to possible oil leak.

One of the ways to increase structures lifetime may be by the reduction of their vibration amplitudes by using viscoelastic materials. These materials can be set to operate in such configurations such as “sandwich structures”. One possible application for this concept is related to the control and the reduction of vibrations in steel catenary risers. One believes that the design of such structures can be optimized by the use of viscoelastic components optimally attached along specific parts of the structure.

The main purpose of this work is present a methodology in order to increase the structural damping factors using the concept of sandwich structures with viscoelastic materials. This application differs from the usual because offshore structures work in lower frequencies than the civil ones, leading the need of an own development for its application.

It was developed a numerical model of the sandwich tubes, and its results are evaluated through experimental tests in simple structures accomplished at the Structures Laboratory at COPPE/UFRJ. Through this analysis it is observed a great addition of damping that would allow a reduction of the vibration levels and an increase of the structures lifetime, for example, in steel catenary risers.

Introdução

A necessidade cada vez maior por petróleo tem levado a indústria a explorar jazidas em águas cada vez mais profundas, conduzindo as estruturas a terem comportamentos cada vez mais complexos. Um dos componentes principais para essa atividade são os *risers*. Estas estruturas são constituídas por tubos de aço e usualmente são dispostas em catenárias, tendo por objetivo conduzir o óleo ou gás entre os poços e as plataformas e estão submetidas a uma série de solicitações dinâmicas. Dentre elas, pode-se destacar a que é induzida pelo desprendimento de vórtices quando a estrutura está submetida a correntes marinhas podendo conduzir a uma menor vida útil devido à fadiga.

O aumento da vida útil dos *risers* é de extrema necessidade, pois sua falha resulta em conseqüências não só econômicas devido à paralisação das operações, mas também ambientais, pois o vazamento de óleo pode causar um desastre ecológico de grandes proporções.

Uma das formas de aumentar a vida útil pode ser através da redução das vibrações. Isto pode ser obtido utilizando materiais viscoelásticos. Estes materiais podem ser utilizados em conjunto com outros tipos de sistemas ou diretamente sobre a estrutura associados ou não a camadas de restrição. Quando estes são associados a camadas de restrição são conhecidos na literatura como “estruturas sanduíche” e permitem que sejam obtidas reduções substanciais nos níveis de vibração.

Com o objetivo de reduzir os efeitos das vibrações, neste trabalho é apresentada uma metodologia para aumentar a taxa de amortecimento de risers rígidos em catenária. O principal objetivo deste trabalho é aumentar a taxa de amortecimento estrutural através do conceito de estruturas sanduíche com materiais viscoelásticos.

Foi desenvolvido um modelo numérico para tubos sanduíche e os resultados foram avaliados através de testes experimentais realizados no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ. É observado um aumento significativo da taxa de amortecimento o que permitiria a redução dos níveis de vibração e o aumento da vida útil de estruturas, como por exemplo, dos risers rígidos em catenária.

As principais etapas apresentadas neste trabalho são a caracterização do material viscoelástico usado nos testes experimentais através da estimativa de um conjunto de parâmetros constitutivos de um modelo mecânico baseado no conceito de variáveis internas e a modelagem numérica de uma estrutura sanduíche de seção reta circular tubular usando O Método dos Elementos Finitos.

Descrição do Modelo Computacional

Neste item são descritos o modelo constitutivo utilizado para representar o material viscoelástico, o qual é baseado no conceito de variáveis internas (Castello *et al*, 2008), e a modelagem desenvolvida para representar as estruturas sanduíche.

Modelo Constitutivo

Uma das formas mais usuais para descrever o comportamento reológico de materiais viscoelásticos é a representação em forma complexa. O módulo complexo é tal que sua parte real representa a rigidez do material viscoelástico, a qual é a energia estocada, e a parte imaginária dividida pela parte real representa o fator de perda, que é a razão entre a energia dissipada por radiano e a energia estocada. A caracterização experimental dos materiais viscoelásticos pode ser dada através de suas propriedades – módulo cisalhante, G , e, fator de perda, η , as quais podem variar com a frequência.

Neste trabalho foi utilizado o Método Direto que recebe esse nome, pois tanto a força aplicada, quanto a resposta de o sistema são medidos diretamente. A formulação matemática do Método Direto pode ser encontrada na dissertação de FAÍSCA (1998).

A literatura conta com diversos modelos mecânicos destinados a reproduzir o comportamento mecânico dos materiais viscoelásticos. No presente trabalho adotou-se um modelo baseado no conceito de variáveis de estado internas. Os modelos baseados no conceito de variáveis internas são, em geral, construídos a partir dos princípios da termodinâmica dos processos irreversíveis (Castello, 2004 e Castello *et al*, 2008).

A Figura 1 apresenta a parte real e imaginária do módulo de cisalhamento obtida experimentalmente pelo método direto e numericamente com o modelo calibrado. A caracterização experimental só pode ser realizada até 25 Hz, já que a partir desta frequência o excitador continuou a apresentar oscilações verticais que perturbaram o ensaio. Desta forma os valores obtidos pelo modelo acima desta frequência são extrapolados, o que pode comprometer os resultados para esta faixa de frequência.

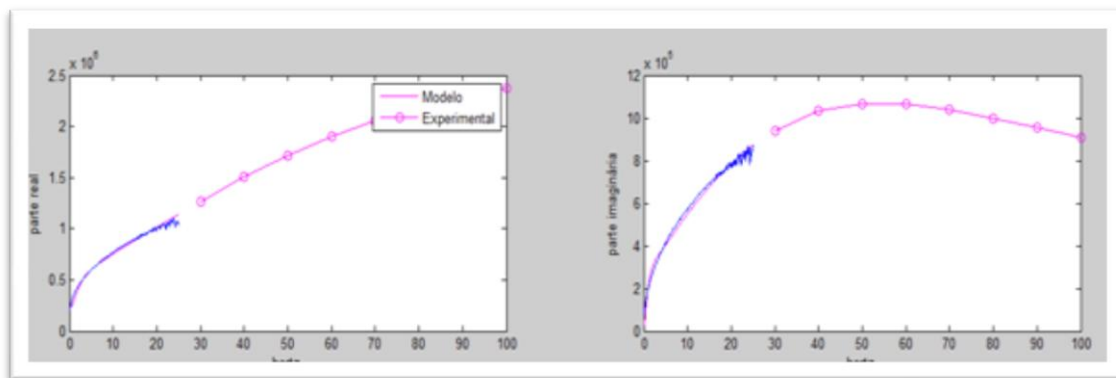


Figura 1: Módulo de Cisalhamento obtido Experimentalmente e com o Modelo Desenvolvido.

Modelagem da Viga Sanduíche

Esta seção tem o objetivo de apresentar, de forma sucinta, a modelagem das estruturas do tipo sanduíche utilizadas para estimar as características dinâmicas destas estruturas.

A Figura 2 (a) e 2 (b) apresenta, respectivamente, a geometria não deformada e a geometria deformada de um elemento diferencial de uma estrutura do tipo viga sanduíche com cinco camadas.

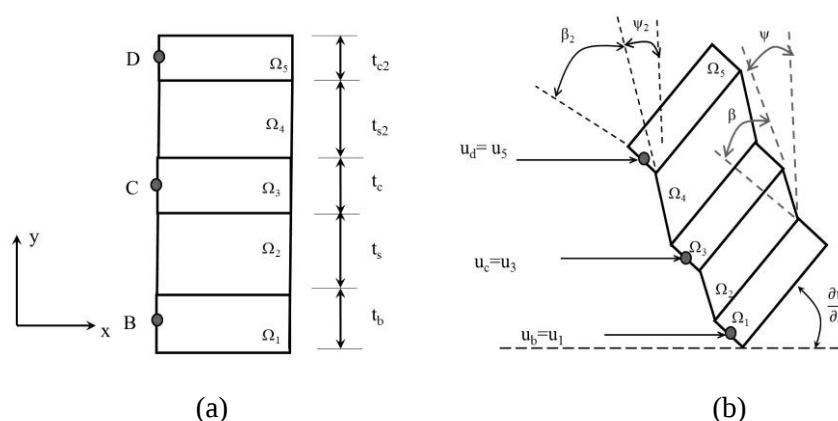


Figura 2: (a) Geometria não-deformada e (b) deformada de um elemento infinitesimal da estrutura do tipo sanduíche.

No contexto mais geral, o elemento apresentado na Figura 2 é composto por cinco camadas as quais são denominadas por Ω_k , $k=1, \dots, 5$. Desta forma, as seguintes hipóteses são adotadas para a modelagem dos meios envolvidos: as camadas ímpares, as quais são elásticas, são modeladas como sendo vigas de Euler-Bernoulli, e as camadas pares, viscoelásticas, são modeladas como sendo componentes sujeitos a modos de operação de cisalhamento puro no plano x - y .

As equações governantes do modelo discretizado podem ser obtidas utilizando-se o método dos elementos finitos (Castello, 2004 e Castello *et al.*, 2008).

Tal modelo computacional pode ser utilizado para obter predições acerca do comportamento mecânico dos sistemas físicos de interesse. Essas predições podem ser tanto histórias temporais de deslocamento, velocidade e acelerações assim como frequências naturais e taxas de amortecimento. Cabe ressaltar que o principal interesse neste trabalho é identificar as características dinâmicas, principalmente a taxa de amortecimento, de maneira a correlacioná-las aos resultados experimentais obtidos.

Descrição dos Testes em Tubos Simples e Sanduíche e Correlação dos Resultados

Esta seção tem como objetivo a descrição dos testes experimentais realizados no LADEPIS, Departamento de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, com o objetivo de estimar os parâmetros modais de estruturas simples e sanduíche a fim de correlacioná-los aos obtidos numérica e analiticamente.

O método utilizado para a estimação dos parâmetros modais foi o *Short Time Fourier Transform* (STFT) desenvolvido por BUCHER (2001). Maiores detalhes também em PITELLA (2006).

Uma viga engastada e livre, de seção reta circular tubular foi excitada através de impactos próximos aos sensores. Os deslocamentos foram medidos através de sensores Balluff LVDT com capacidade de 0.5 a 2.0 mm, sem contato a fim de que não fosse introduzido amortecimento ou massa a estrutura.

Os sensores foram localizados a aproximadamente 20 cm do engaste, como apresentado na Figura 3.



Figura 3: Detalhe dos sensores

Nesta análise todas as situações ensaiadas possuem camadas de restrição livres nas duas extremidades. As camadas de restrição foram dispostas de forma que o tubo possuísse alta taxa de amortecimento em qualquer direção, como mostrado na Figura 4.

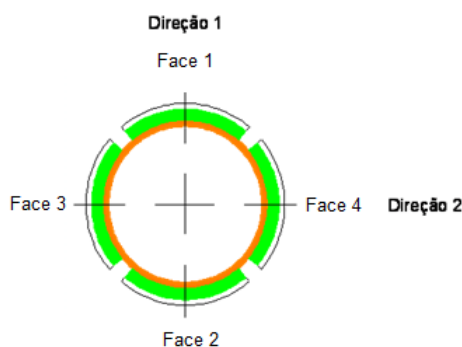


Figura 4: Seção reta tubular da viga sanduíche

O tubo base e as camadas de restrição são de latão com aproximadamente 1.6 m de comprimento. O material viscoelástico utilizado foi a fita dupla face VHB 4970, produzida pela 3M. A Tabela 1 apresenta as propriedades geométricas consideradas na modelagem numérica.

Tabela 1: Propriedades geométricas das camadas do tubo.

Camada (Material)	Propriedades geométricas
Tubo Interno (Latão)	Comprimento = 1600 mm Raio Externo = 9.46 mm Espessura = 1.06 mm
Material Viscoelástico (Fita VHB 4970)	Comprimento = 1600 mm Raio Externo = 11.86 mm Espessura = 2.4 mm
Restrição (Latão)	Comprimento = 1600 mm Raio Externo = 12.63 mm Espessura = 0.80 mm

Para o latão foram tomadas as seguintes propriedades físicas: Módulo de Young $E=137$ GPa e uma densidade de massa $\rho=8940$ Kg/m³. O coeficiente de Poisson foi assumido como 0.3. A Tabela 2 apresenta os parâmetros modais do tubo simples obtidos experimental e analiticamente.

Tabela 2: Parâmetros modais do tubo simples (tubo base)

Modo	Experimental (Dir. 1)		Experimental (Dir. 2)		Analítica
	Freq. (Hz)	ξ (%)	Freq. (Hz)	ξ (%)	Freq. (Hz)
1	5.17	0.05	5.12	0.05	5.15
2	32.11	0.04	31.89	0.03	32.27
3	89.12	0.03	88.43	0.03	90.62
4	172.50	0.04	171.26	0.03	177.10

Os resultados experimentais observados na Tabela 2 indicam que o tubo simples apresenta alguma imperfeição, já que as frequências naturais nas duas direções não são iguais demonstrando que este não é perfeitamente simétrico. Para aproximar as frequências naturais teóricas das experimentais foi necessário diminuir o módulo de elasticidade do latão de 4%, valor este que será utilizado na modelagem numérica da viga sanduiche.

O material viscoelástico e a camada de restrição foram adicionados gradualmente na seguinte seqüência: face 1, face 2, face 3 e face 4, as quais estão indicadas na Figura 4. Para entender melhor o comportamento dessas situações, a Tabela 3 reproduz os resultados experimentais obtidos quando o material viscoelástico e a camada de restrição foram instalados nas faces 1 e 2 e nas faces 1 a 4.

Analisando-se na Tabela 3 as taxas de amortecimento obtidas para a situação Faces 1 e 2 pode-se concluir que a instalação do material viscoelástico e das camadas de restrição não afetaram estes parâmetros modais na direção 2 se comparado com o aumento obtido na direção 1. No entanto, este comportamento não se verifica quando foi completada a viga sanduíche nas faces 3 e 4. Observa-se ainda na Tabela 3 que o tubo sanduiche com material viscoelástico e camada de restrição instalados em todas as faces (Faces 1 a 4) apresenta uma certa imperfeição, já que os parâmetros modais nas direções 1 e 2 deveriam ser iguais e não o são. Isto se deve a imprecisões de montagem durante a instalação das camadas viscoelásticas e de restrição, associada a uma pequena imperfeição no tubo já

observada anteriormente. Desta forma, pode ser que os resultados associados às Faces 1 e 2 estejam muito influenciados pelas imperfeições. Além disso, como no tubo sanduiche em catenária o material viscoelástico e a camada de restrição serão instalados em todas as 4 faces, e como o modelo numérico só simula a vibração em um plano, foi adotado como referência para comparação com os resultados numéricos a média dos parâmetros modais obtidos nas direções 1 e 2 para a situação Faces 1 a 4. A Tabela 4 apresenta esta comparação.

Tabela 3: Parâmetros modais do tubo sanduiche obtidos experimentalmente

Modos	Faces 1 e 2				Faces 1 a 4			
	Dir. 1		Dir. 2		Dir. 1		Dir. 2	
	Freq (Hz)	ξ (%)	Freq (Hz)	ξ (%)	Freq (Hz)	ξ (%)	Freq (Hz)	ξ (%)
1	4.85	5.59	4.23	0.25	4.26	4.96	4.16	3.87
2	30.8	7.21	26.41	0.33	29.11	6.33	39.54	5.38
3	82.3	5.82	73.5	0.27	*	*	*	*

(*) Valores não obtidos

Tabela 4: Comparação dos parâmetros modais do tubo sanduiche

Modo	Experimental		Numérico	
	Freq. (Hz)	ξ (%)	Freq. (Hz)	ξ (%)
1	4.21	4.41	4.59	4.1
2	34.33	5.86	31.75	5.18
3	*	*	84.47	4

(*) Valores não obtidos

Analisando-se os resultados da Tabela 4 pode-se concluir que a modelagem numérica representa adequadamente o comportamento da viga sanduíche com duas camadas de material viscoelástico e duas camadas de restrição, e por esta razão este tipo de modelagem também será utilizada nas simulações numéricas da catenária.

Comentários Finais

Neste trabalho foi apresentada a caracterização do material viscoelástico, baseada no conceito de variáveis internas, a modelagem numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos, os ensaios experimentais em tubos simples e sanduíche. Os resultados numéricos e experimentais foram comparados.

Os resultados dos ensaios mostraram que, de forma geral, ha um grande acréscimo de amortecimento com o incremento de material viscoelástico e restrição. Isso permitiria uma redução dos níveis de vibração aumentando a vida útil da estrutura.

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que o modelo numérico representa bem o comportamento do tubo sanduíche, permitindo o projeto de estruturas com grande taxa de amortecimento.

Referências Bibliográficas

Borges, F. C. L., *Análise do Comportamento Dinâmico de Vigas Sanduíche com Múltiplas Camadas*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

Bucher, H.F., *Methodologies for the Applications of Time-Frequency Techniques to Structural Dynamics and to the Boundary Element Method (in Portuguese)*, D.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, COPPE/Federal University of Rio de Janeiro, September, 2001.

D.A.Castello, *Modelagem e Identificação de Materiais Viscoelásticos no Domínio do Tempo*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, 2004.

D.A .Castello, F.A.Rochinha, N.Roitman and C. Magluta, *Constitutive Parameter Estimation of Viscoelastic Materials*, MSSP, vol.22, Issue 8., pp.1840-1857, 2008.

Koza, J.R.. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. MIT Press, 1992.

L.Dietric et. al., T.Lekszycki and K.Turski, 1998, *Problems of Identification of Mechanical Characteristics of Viscoelastic Composites*, Acta Mechanica 126, pp.153-167, 1998.

M. Geradin e D.Rixen, *Mechanical Vibrations: Theory and Application to Structural Dynamics*, Wiley, 1997. Nashif, A.D. & Jones, D. I. G., *Vibrational Damping*, Wiley-Interscience Publication – John Wiley & Sons Inc, 1985.

Oliveira, O., *Adição de Amortecimento Estrutural Usando Materiais Viscoelásticos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2006.

Santos, C. M. P. M, *Análise de Estruturas Esbeltas Offshore Sujeitas a Vibrações Induzidas por Vórtices (Viv)*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, 2005.

T.Pritz, *Loss factor peak of viscoelastic materials: magnitude to width relations*, Journal of Sound and Vibration, Journal of Sound and Vibration, Vol.246, Issue 2, Pages 265-28, 2001.

W.H. Press, S.A. Teukolsky, A.W.T. Vetterling, and B.P. Flannery. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, New York, 1992.