

ANÁLISE DE ESTRUTURAS FLEXÍVEIS COM APLICAÇÃO DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

Queiroz, J.A.S.¹; Marques, A.S.²; Capello Souza, E.A.³

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus Bauru / SP - Brazil

² Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus Bauru / SP - Brazil

³ Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus Bauru / SP - Brazil

RESUMO

Os materiais viscoelásticos têm sido muito utilizados para atenuar vibração e ruído em estruturas, devido a sua capacidade inerente de absorver uma porcentagem de energia vibratória dos sistemas mecânicos e de dissipá-la sob a forma de calor. Esse tipo de amortecimento tem sido utilizado em muitas aplicações nas indústrias automotiva e aeroespacial, porém as propriedades dinâmicas das estruturas viscoelásticas não são fáceis de serem determinadas, pois suas respostas dependem de muitos fatores externos, tais como a geometria da estrutura, a frequência de excitação a qual a estrutura está submetida, entre outros. Neste trabalho foi implementado um aparato experimental composto por um motor de corrente contínua, controlado por Modulação por Largura de Pulso (PWM), ao qual se engastou uma estrutura flexível, com e sem revestimento viscoelástico. O objetivo foi analisar tal estrutura quando excitada em movimento livre e forçado. Este último permitiu aumentar as deformações cisalhantes na camada viscoelástica e, conseqüentemente, aumentou a dissipação de energia vibratória. Essas análises permitiram uma compreensão da influência dos materiais viscoelásticos na natureza de vibração dessas estruturas.

1- INTRODUÇÃO

A importância do estudo das estruturas flexíveis e análise do melhor revestimento viscoelástico a ser aplicado, devem-se a grande quantidade de equipamentos sujeitos a solicitações dinâmicas, como é o caso de estruturas aeronáuticas, que embora sejam consideradas uma estrutura rígida, quando submetida a efeito de grandes acelerações passam a ter comportamento dinâmico. Este comportamento pode ser minimizado com a determinação de revestimentos viscoelásticos.

O estudo das vibrações está dividido em duas classes: livre e forçada. Quando o sistema sofre um deslocamento inicial e é liberado sob ausência de forças externas, denomina-se vibração livre. Nesse movimento, a estrutura oscila sob influência de suas frequências naturais, decorrente da distribuição de sua massa e

rigidez. Quando o sistema está submetido às excitações externas, é caracterizado como vibração forçada. Para esse tipo de vibração, a estrutura oscila com a mesma frequência de oscilação da fonte geradora. Um dos maiores problemas em estruturas de edifícios, pontes e asas de avião é causado quando a frequência de excitação externa coincide com a frequência natural do sistema. Esses efeitos dinâmicos são freqüentemente induzidos, tanto por causas naturais quanto pelas ações humanas, tais como terremotos, vento e tráfego, causando problemas de operação, desconforto aos usuários, fadiga, dano estrutural e até o colapso.

Quando a estrutura encontra-se em movimento livre ou forçado, dissipa energia por meio de tensões internas, geradas pelas ligações das cadeias moleculares, atrito entre a estrutura e o meio, deformações plásticas, etc. As amplitudes de vibração serão menores

quanto maior for a capacidade da estrutura em dissipar energia. Alguns materiais utilizados em estruturas aeronáuticas, plantas industriais e construção de edifícios apresentam amortecimento muito baixo, o que resulta em amplitudes maiores de vibração.

Com a finalidade de amenizar a amplitude dos deslocamentos produzidos pelas ações dinâmicas sobre estruturas, muitos engenheiros e pesquisadores têm estudado mecanismos de amortecimentos para aumentar sua capacidade de dissipar energia. Uma forma para elevar as taxas de amortecimento, é a aplicação de materiais com propriedades amortecedoras, que, quando aplicados na superfície de estruturas com baixo fator de amortecimento, apresentam enorme capacidade de atenuar as vibrações e diminuir as amplitudes de deslocamentos. Essa solução que visa o incremento das taxas de amortecimento de estruturas refere-se à utilização de materiais viscoelásticos como elementos que têm grande capacidade de dissipar energia.

Os materiais viscoelásticos têm sido amplamente estudados como mecanismo de amortecimento de vibração de sistemas dinâmicos, devido a sua grande capacidade de absorver partes da energia de vibração das estruturas e dissipá-las em forma de calor. Esses materiais podem ser aplicados como juntas ou apoios viscoelásticos, ou sob a forma de tratamento superficial. Para este último, os materiais viscoelásticos podem ser aplicados de duas formas: Camada Livre ou Camada de Restrição.

A configuração camada livre é o nome dado para a estrutura que é submetida a uma simples camada de material viscoelástico sobre uma de suas superfícies, e seu amortecimento é gerado devido às forças de tração e compressão sobre o material viscoelástico.

A configuração chamada de camada restrita consiste em dispor uma camada de material viscoelástico entre a camada da estrutura base e uma fina camada metálica. Esse tipo de configuração permite aumentar enormemente as deformações cisalhantes na camada viscoelástica e,

como consequência, um aumento na dissipação de energia vibratória. Essa configuração também é conhecida por viga sanduíche.

A importância dos estudos dos materiais viscoelásticos deve-se ao fato de esses estarem presentes nos diversos setores das indústrias. Esses estudos buscam aprofundar formulações e modelos numéricos para descrever o comportamento deste mecanismo de amortecimento. Como exemplo de estudos realizados na indústria automotiva, encontram-se pesquisas que tinham como objetivo realizar modelagens (não-linear e viscoelástica) e identificação de parâmetros viscoelásticos de um tipo de espuma flexível, a base de poliuretano, para aplicação em assentos automotivos.

A dificuldade de determinar as propriedades dinâmicas dos materiais viscoelásticos por meio de modelagens computacionais deve-se ao fato de que elas dependem de vários fatores externos, tais como a frequência de excitação ao qual a estrutura está submetida, as variações de temperatura, a geometria da estrutura, entre outros.

Neste trabalho, busca-se analisar de forma prática o comportamento das estruturas flexíveis revestidas por materiais viscoelásticos, com uma de suas extremidades engastadas em um aparato experimental. Essas análises dinâmicas em uma estrutura revelam importantes características sobre seu comportamento em movimento livre ou sob ação de forças externas. A experiência consiste em comparar o comportamento das estruturas, obtido no domínio do tempo e no domínio da frequência, quando ensaiadas em movimento livre e forçado. Inicialmente foram realizados ensaios de uma estrutura com sensores acoplados em locais diferentes, em relação ao engaste para verificar se a resposta seria a mesma para diferentes posições da estrutura. O segundo ensaio realizado tinha como objetivo comparar o comportamento das estruturas ensaiadas em configuração camada livre, sem e com material viscoelástico. E por fim a análise de uma estrutura na configuração viga sanduíche,

composta por duas estruturas iguais de aço separadas por uma camada de espuma acrílica.

A partir dos ensaios experimentais com o emprego de amortecedores viscoelásticos em camada livre e na configuração viga sanduíche, foram estimadas as frequências naturais e as amplitudes de vibração dos espécimes ensaiados, avaliando-se a eficiência de cada configuração para a redução de vibrações e o conseqüente incremento das taxas de amortecimento. Esses resultados permitiram demonstrar quais das configurações foram mais eficientes no aumento de amortecimento estrutural e analisar o comportamento das estruturas em relação às diferentes frequências de excitação.

1.1 - Materiais viscoelásticos

A utilização de elementos viscoelásticos como dissipadores de energia em sistemas dinâmicos são bastante comuns, como podemos comprovar nos trabalhos de Grinenko e Mokeev, 1989, analisando o problema de um cilindro revestido por material viscoelástico, Rao et al, 1992, avaliando placas compostas com materiais viscoelásticos, Rikards et al, 1993, analisando vigas viscoelásticas e Chen e Huang 2001, analisando placas cilíndricas parcialmente cobertas nos sistemas viga sanduíche.

De acordo com Sousa, (1999), a grande capacidade e eficiência de absorção de energia permitem que sejam aplicados com frequências para aumentar o amortecimento do sistema, tornando-se um bom absorvedor de vibrações para sistemas dinâmicos. Entretanto, a eficiência desses sistemas de amortecimentos está diretamente relacionada com a constituição do sistema mecânico, tal como a definição da rigidez e da inércia do sistema.

2- CONCEITOS DE AMORTECIMENTOS EM SISTEMAS DINÂMICOS

De acordo com Crandall (1970), amortecimento pode ser definido como a retirada de energia de um sistema vibrante, que pode ser transmitida para fora do sistema por meio de mecanismos de radiação ou pode ser dissipada internamente no sistema. Vibrações resultam da contínua e repetitiva conversão da energia cinética em potencial e vice-versa. Para um sistema vibrante livre, a perda de energia devida ao amortecimento provoca o decaimento de vibrações.

O amortecimento de sistemas mecânicos é quantificado pelo fator de amortecimento η expresso na Eq. (1), definida como a razão entre a energia dissipada por radiano e a máxima quantidade de energia armazenada durante o ciclo.

$$\eta = \frac{W}{2\pi V} \quad (1)$$

Segundo Oliveira (2006), um grande número de mecanismos de dissipação ocorre internamente a um elemento de material quando este é deformado ciclicamente. Todos esses mecanismos estão associados com reconstituições ou reconstruções internas da microestrutura e/ou da macroestrutura, com efeitos em escala da ordem do retículo do cristal até efeitos em escala molecular.

2.1 - Mecanismos internos de amortecimento em metais

Lazan (1968) afirma que a inelasticidade presente em todos os tipos de carregamento manifesta-se por uma grande variedade de mecanismos de dissipação de energia. Assim, em todos os casos, materiais ou sistemas mecânicos que dissipam energia sob carga cíclica, evidenciam um fenômeno em comum: a curva cíclica de tensão-deformação forma um laço de histerese. A Fig. 1 mostra uma curva característica de histerese. A área hachurada entre os dois ramos da curva histerética representa a energia dissipada pelo amortecimento interno. Portanto, essa capacidade de dissipação de energia é

definida como mecanismo interno de amortecimento.

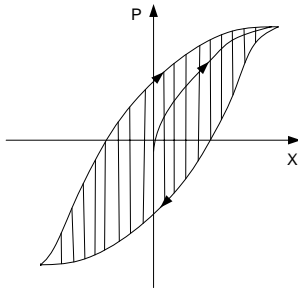


Fig. 1 – Laço histerético não-linear típico.
(Adaptado de Lazan, 1968)

Grande parte da energia absorvida internamente é dissipada sob a forma de calor. Em alguns casos, uma parcela dessa energia é absorvida internamente devido às mudanças estruturais que surgem do nível de energia do sistema. Essa energia de amortecimento é definida pela eq. 2.

$$D = \oint \sigma \cdot d\varepsilon \quad (2)$$

Sendo:

D = energia por unidade de volume por ciclo de carregamento absorvida por um material macroscopicamente uniforme;
 σ = tensão no interior do material;
 ε = deformação no interior do material.

2.2 - Mecanismos de amortecimento em materiais viscoelásticos

Em Ferry (1980), os materiais viscoelásticos estão definidos como materiais poliméricos formados por longas cadeias moleculares e representado pela Fig. 2. Nessa figura, os átomos de carbono são fortemente unidos e ramificados, de modo que o processo de composição e polimerização é que determina a força das ligações nas cadeias moleculares.

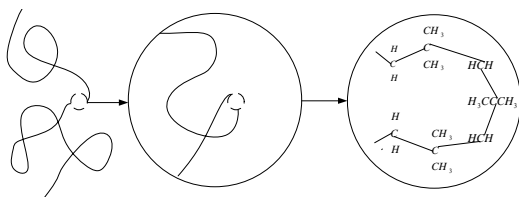


Fig. 2 – Cadeias moleculares em materiais viscoelásticos (Adaptado de Ferry (1980)).

De acordo com Jones (2001), materiais viscoelásticos possuem propriedades diferentes e peculiares de acordo com a temperatura. Essas propriedades, como podem ser vistas na Fig. 3, podem ser classificadas como: vítrea, quando o material encontra-se no estado mais rígido; transição, quando as propriedades do material encontram-se entre o estado vítreo e a região classificada como “estado de borracha”; e a própria região de borracha. Quando o material está sob altas temperaturas, possui mobilidade suficiente para que a deformação acompanhe a tensão aplicada sem grande diferença de fase, resultando em pequenas taxas de amortecimentos. Nesse instante, o material encontra-se no estado de borracha. Estando o material em baixas temperaturas, seu estado é rígido, com tendência a fragilidade e conseqüentemente sem ou com baixo amortecimento. O amortecimento máximo é obtido quando o material encontra-se na região de transição, em que o módulo de elasticidade toma um valor intermediário.

Na Fig. 3 ainda pode ser vista a dependência do material com a frequência. Mobilidade suficiente para a deformação acompanhar a tensão em baixas frequências, maior rigidez em altas frequências e o maior fator de amortecimento para frequências intermediárias localizadas na região de transição.

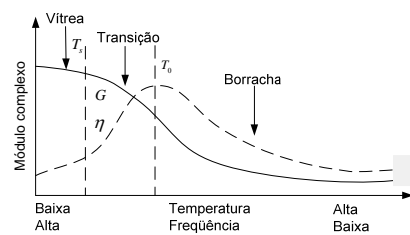


Fig. 3 – Comportamento de materiais viscoelásticos
(Adaptado de Jones (2001)).

O material tem esse comportamento devido à interação das cadeias moleculares. As moléculas do material estão inativas em baixas temperaturas, ficando próximas uma das outras e tornando o material mais rígido. Dessa forma, o movimento relativo entre as moléculas é reduzido, havendo pouco

atrito intermolecular e, conseqüentemente, baixo amortecimento. Nas temperaturas mais altas, as moléculas se tornam ativas e se movem com maior facilidade resultando em baixa rigidez. Com a baixa interação entre as moléculas, a dissipação de energia é baixa devido ao atrito intermolecular. O máximo fator de amortecimento resulta da interação entre as moléculas que apresentam módulo de rigidez intermediária quando se encontra em temperaturas intermediárias.

Quanto às frequências, a inércia das moléculas resulta em pouco movimento relativo e baixa dissipação em altas frequências. Com baixas frequências, as moléculas têm mobilidade suficiente nas cadeias moleculares para que a deformação acompanhe a tensão com baixa interação entre as moléculas e pouca dissipação. Como aconteceu na temperatura, em frequências intermediárias tem-se inércia de moléculas intermediária, resultando valores máximos de amortecimento.

2.3 - Mecanismos de amortecimento em materiais viscoelásticos

Os primeiros estudos sobre a aplicação dos materiais viscoelásticos como amortecedores de vibração estrutural se deram na década de 1950, quando podem ser referenciados os realizados por Ross et al (1959), os quais utilizaram materiais viscoelásticos em estruturas que vibravam a flexão.

Segundo Pitella (2006), o conceito de amortecimento de uma estrutura pode ser dado como sendo a energia dissipada durante o processo de movimentos oscilatórios. Uma forma de reduzir vibrações é através da elevação das taxas de amortecimento. O que explica o interesse científico na utilização de materiais com propriedades amortecedoras. Esses materiais com grande capacidade de dissipar energia, aplicados em materiais de baixa absorção de vibrações, apresentam enorme capacidade de atenuar e diminuir as amplitudes de deslocamentos até que o movimento vibratório cesse

completamente, quando a estrutura é deixada em vibração livre.

A utilização de materiais viscoelásticos para atenuação de vibração em estruturas pode ser feita como demonstra a Fig. 4, na qual Nashif (1985) propõe a aplicação de uma camada de material viscoelástico em um dos lados da estrutura. O amortecimento para essa configuração é predominado por deformação extencional, de modo que o material amortecedor sofre deformações por tração-compressão, alongando-se e deformando-se de forma extensional (longitudinal), gerando o amortecimento de vibração no sistema. Esse sistema de amortecimento é conhecido como “configuração de camada livre”.

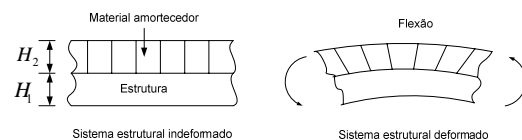


Fig. 4 – Revestimento de material viscoelástico de camada livre (Adaptado de Nashif, 1985).

De acordo com Ross et al (1959), a configuração mais simples capaz de reproduzir tanto amortecimento devido à deformação extensional como amortecimento devido ao cisalhamento é o sistema conhecido como estrutura sanduíche, composto por três camadas (Fig. 5). O amortecimento por cisalhamento ocorre no conjunto quando o material de amortecimento é usado entre a placa a ser amortecida e uma camada de cobertura relativamente rígida, denominada camada de restrição.

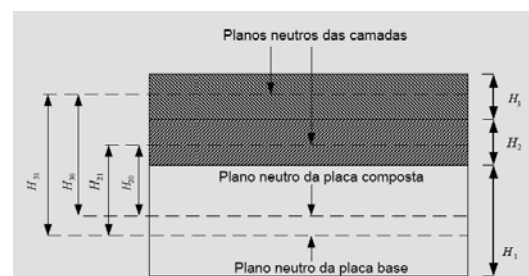


Fig. 5 – Placa sanduíche – esquema de espessuras e planos neutros (Ross et al, 1959).

A Eq. 3 determina o fator de perda para configuração em que o cisalhamento é inexistente ou desprezível.

$$\frac{\eta}{\eta_2} = \frac{k_2 [12h_{21}^2 + h_2^2 (1 + k_2)]}{[1 + k_2] [12k_2 h_{21}^2 + (1 + k_2)(1 + k_2)h_2^2]}$$

Onde:

$\frac{\eta}{\eta_2}$ = quociente entre o fator de perda da placa base pelo fator de perda da camada de material viscoelástico.

3- OBJETIVOS DO TRABALHO

3.1 - Objetivo Geral

Estudo do comportamento de estruturas flexíveis, em movimento livre e forçado, com e sem revestimento viscoelástico.

3.2 - Objetivos específicos

Construção de um aparato experimental para ensaios de movimento forçado.

Verificar se o comportamento apresentado por uma estrutura é o mesmo para diferentes posições.

Analisar o comportamento de uma estrutura com configuração camada livre, quando revestida por material viscoelástico.

Analisar o comportamento de uma estrutura com material viscoelástico e camada de restrição.

4- MÉTODOS

4.1 - Estruturas Flexíveis

As análises descritas neste trabalho foram realizadas utilizando-se seis estruturas de aço inox, com dimensões descritas na Fig. 6.

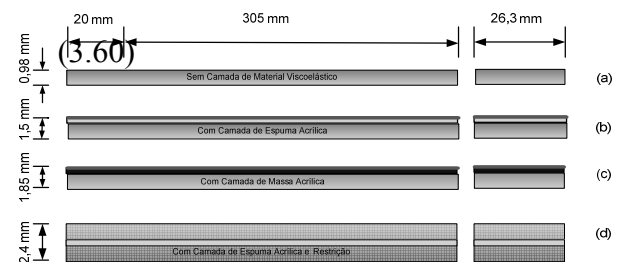


Fig. 6 – Dimensões das estruturas utilizadas nos ensaios

Essas estruturas foram instrumentadas e classificadas da seguinte maneira:

Estrutura 1 – Estrutura com dimensões ilustrada na Fig. 6 (a). Utilizada sem aplicação de materiais viscoelásticos e instrumentada de forma a obter respostas da estrutura a 80 mm e 190 mm do engaste. O objetivo dessa estrutura foi analisar se o comportamento apresentado era o mesmo para pontos diferentes.

Estrutura 2 – Estrutura sem camada de material viscoelástico, conforme Fig. 6 (a), com sensor a 80 mm do engaste.

Estrutura 3 – Estrutura com camada de espuma acrílica, conforme Fig. 6 (b), instrumentada com sensor a 80 mm do engaste.

Estrutura 4 – Estrutura com camada de massa acrílica, conforme Fig. 6 (c), instrumentada com sensor a 80 mm do engaste.

Estrutura 5 – Estrutura composta por duas estruturas separada por uma camada de espuma acrílica, conforme Fig. 6 (d), instrumentada com sensor a 80 mm do engaste. A segunda estrutura é conhecida como camada de restrição, e o conjunto é conhecido por viga sanduíche.

As espessuras apresentadas na Fig. 6 referem-se à estrutura mais a camada correspondente.

4.2 - Materiais viscoelásticos

Os materiais viscoelásticos utilizados como amortecedores de vibrações nas estruturas flexíveis foram as fitas dupla face da 3M™, VHB™ (Very-High-Bond) Incolor 4915 constituídas de uma massa de

adesivo acrílico e a VHB™ Branca 4930 constituída de espuma acrílica.

É importante destacar que as fitas VHB™ da 3M™ têm sido referenciadas em estudos sobre amortecimento com material viscoelástico. Entre esses, destacam-se os de trabalhos de Pitella (2006) e de Faísca (1998).

4.3 - Aparato experimental

A fig. 7 ilustra a vista superior do aparato. Quando o motor encontra-se em funcionamento, o disco excêntrico acoplado ao eixo do motor faz, por meio do conjunto de hastes, que o engaste exerça sobre a estrutura movimentos oscilatórios.

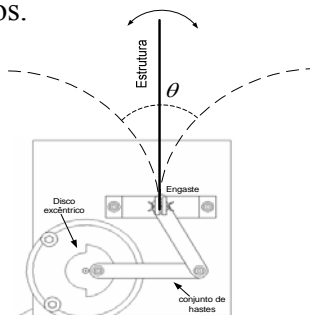


Fig. 7 Vista superior do aparato experimental.

4.4 - Arranjo para movimento livre

Nas análises em movimento livre foi acrescentado em frente a estrutura um sistema de alavanca para garantir o mesmo deslocamento nos ensaios. O arranjo para estas experiências encontra-se na Fig. 8.

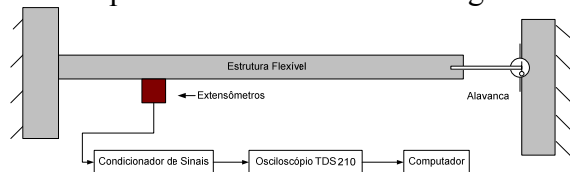


Fig. 8 – Representação esquemática do arranjo utilizado para análise de movimento livre

4.5 - Arranjo para movimento forçado

A configuração final para o movimento forçado encontra-se na Fig. 9.

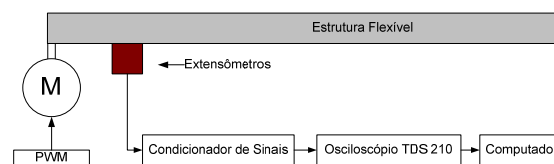


Fig. 9 – Representação esquemática do arranjo utilizado para análise de movimento forçado

4.6 - Análise computacional

Para fornecer uma representação de como os sistemas se comportam, foram gerados modelos de elementos finitos das estruturas ensaiadas em movimento livre utilizando o software ANSYS®. Esses não tinham como objetivo confrontar valores numéricos, mas estimar comportamentos das estruturas com e sem material viscoelástico.

Para construção desses modelos no ANSYS®, foi preciso definir o tipo de elemento (viga ou placa), suas constantes reais, propriedades dos materiais (módulo de elasticidade, densidade, fator de amortecimento e coeficiente de Poisson), a geometria do modelo (área, modelo de inércia, altura, largura, espessura, etc.) e disposição dos elementos estruturais (coordenadas nodais).

5- RESULTADOS

5.1 - Análise do comportamento da estrutura para diferentes posições

A seguir serão apresentados os resultados quando a estrutura 1 (estrutura sem revestimento viscoelástico com sensores acoplados em duas posições diferentes) foram ensaiadas em movimento livre e forçado.

5.1.1 - Análise da Estrutura em Movimento Livre

Ao sofrer o impulso causado pela alavanca, a energia adquirida pela estrutura 1 foi dissipada, descrevendo o movimento da Fig.10.

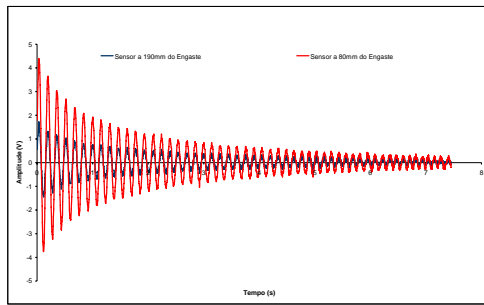


Fig.10 – Resposta no domínio do tempo para estrutura 1 analisada em movimento livre

De acordo com essa figura, os dois pontos analisados apresentaram o mesmo comportamento, oscilando com a mesma frequência. Quanto às amplitudes, os sensores localizados a 80 mm do engaste apresentaram valores maiores por sofrer maior deflexão.

A Fig. 11 ilustra o comportamento da frequência natural da estrutura 1. Como foi visto na Fig. 10, os sensores obtiveram o mesmo comportamento, porém amplitudes maiores para o ponto mais próximo do engaste, em razão de sofrer maior deflexão.

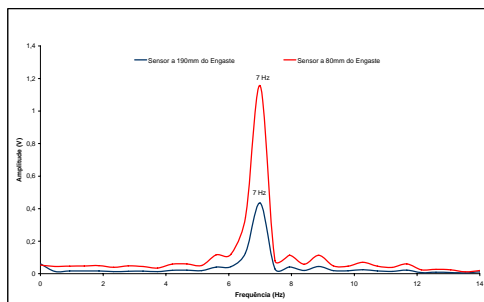


Fig. 11 – Resposta no domínio da frequência para a estrutura 1 ensaiada em movimento livre

5.1.2 Análise da Estrutura em Movimento Forçado

A Fig. 12 representa a série temporal da estrutura 1, quando o motor foi excitado em 3,83 Hz. Nesse ensaio ficou evidente, conforme Fig. 13, que as frequências envolvidas no sistema são as mesmas para pontos diferentes da estrutura. As diferenças apresentadas foram as amplitudes, que estão relacionadas com a distância do sensor ao engaste. Quanto mais próximo do engaste, maior será a deflexão exercida sobre os extensômetros.

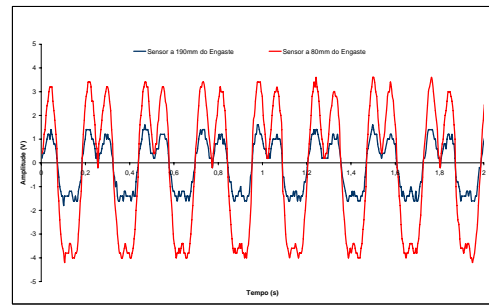


Fig. 12 – Respostas no domínio do tempo para ensaios da estrutura 1 quando o motor foi excitado com 3,83 Hz

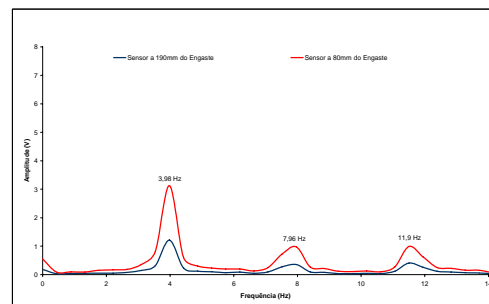


Fig. 13 – Respostas no domínio da frequência para estrutura 1 quando o motor foi excitado com 3,83 Hz

5.2 - Análise da estrutura da configuração de camada livre com e sem material viscoelástico

5.2.1 Movimento livre

A Fig. 14 ilustra o gráfico comparativo da estrutura 2 (sem camada de material viscoelástico), estrutura 3 (com uma camada de espuma acrílica) e estrutura 4 (com uma camada de massa acrílica) ensaiada em movimento livre. Esta figura evidencia que, com o acréscimo de materiais viscoelásticos, ocorre a mudança na rigidez da estrutura, o que deslocou as frequências naturais para a esquerda do gráfico.

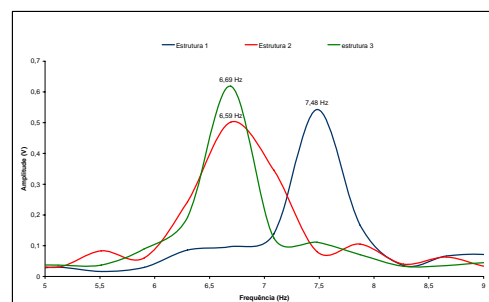


Fig. 14 – Comparação das frequências naturais das estruturas 2, 3 e 4 em movimento livre

5.2.2 Movimento Forçado

No movimento forçado, analisou-se o comportamento das frequências naturais com relação à frequência de excitação do motor. Nessas análises, observou-se que, em função da frequência de excitação do motor, os valores de algumas frequências diminuíram e outras aumentaram de acordo com o tipo de material viscoelástico aplicado.

5.2.3 Comportamento quando o motor foi excitado com 2,2 Hz

A frequência mais baixa capaz de movimentar o motor com as estruturas acopladas foi de 2,2 Hz. Nessa frequência, observou-se que houve o enrijecimento da estrutura 4 (Fig. 17), o que fez com que sua frequência natural se deslocasse para a direita da frequência da estrutura 2 (Fig. 15).

Comparando as Figuras 15 e 16, identifica-se na estrutura 3 o surgimento e o aumento de amplitudes, de frequências que não eram excitadas na estrutura 2. Esse fenômeno também acontece, mas, com menor incidência, na estrutura 4 (Fig. 17).

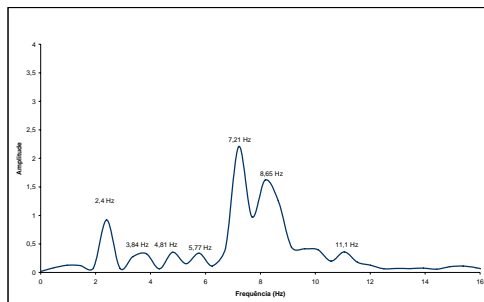


Fig. 15 – Resposta no domínio da frequência da estrutura 2 quando o motor foi excitado com 2,2 Hz

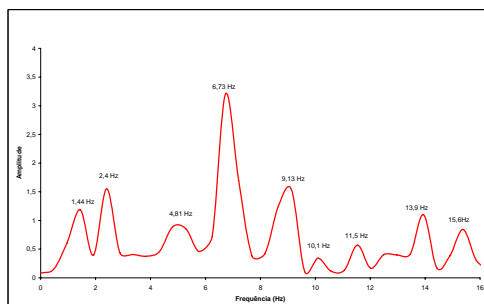


Fig. 16 – Resposta no domínio da frequência da estrutura 3 quando o motor foi excitado com 2,2 Hz

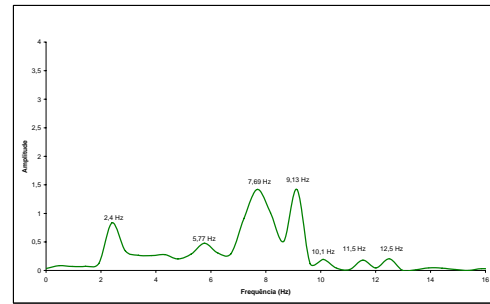


Fig. 17 – Resposta no domínio da frequência da estrutura 4 quando o motor foi excitado com 2,2 Hz

O gráfico da Fig. 18 apresenta o intervalo de 6 a 10 Hz das respostas no domínio das frequências apresentadas nas Figuras 15, 16 e 17.

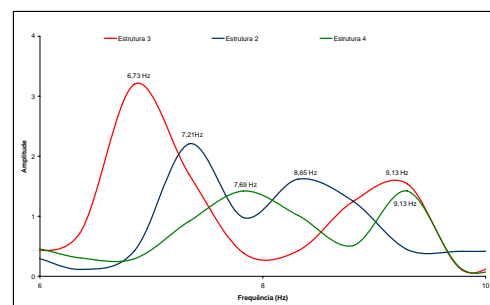


Fig. 18 – Comparação das frequências compreendidas no intervalo de 6 Hz a 10 Hz, para as estruturas 2, 3 e 4 quando o motor foi excitado com 2,2 Hz.

Esse intervalo foi escolhido para representar o comportamento das frequências naturais das estruturas em movimento forçado, e, por meio de um comparativo com os valores obtidos em movimento livre, observa-se que:

- A frequência da estrutura 2 diminuiu de 7,48 Hz para 7,21 Hz;
- Nessa frequência de excitação houve o enrijecimento da estrutura 4, deslocando a frequência natural de 6,69 Hz para 7,69 Hz;
- A frequência da estrutura 3 subiu de 6,59 para 6,73 Hz e apresentou maior amplitude em relação às estruturas 2 e 4;
- A frequência da estrutura 4 apresentou a menor amplitude e maior largura de banda conforme Tab. 1
- A estrutura 3 apresentou maior amplitude que a estrutura 2, como pode ser visto na Tab. 1, e menor largura de banda.

A Tab. 1 representa os valores das amplitudes, frequências naturais e largura de banda das estruturas quando o motor foi excitado com 2,2 Hz.

Tab.1 – Características das frequências naturais quando o motor foi excitado com 2,2 Hz

Tipo	f_n (Hz)	Amplitude (V)	Largura de Banda (LB)	$\xi = \frac{2LB}{f_n}$
Estrutura 2	7,21	2,20	0,48	133×10^{-2}
Estrutura 3	6,73	3,21	0,54	160×10^{-2}
Estrutura 4	7,69	1,42	0,91	237×10^{-2}

5.2.4 Comportamento quando o motor foi excitado com 2,4 Hz

Comparando o comportamento das frequências naturais, compreendidas no intervalo de 6 a 10 Hz e ilustradas na Fig. 19, nota-se que as frequências das estruturas com revestimentos viscoelásticos (estrutura 3 e estrutura 4) deslocaram-se para a esquerda da estrutura 2, apresentando o mesmo comportamento das estruturas ensaiadas em movimento livre, conforme Fig. 14.

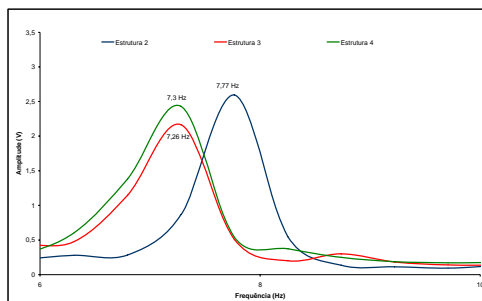


Fig. 19 – Comparação das frequências compreendidas no intervalo de 6Hz a 10Hz, para as estruturas 2, 3 e 4, quando o motor foi excitado com 2.4 Hz

Segundo Inman (1996), a largura de banda é considerada como a perda de energia por ciclo de carregamento. De acordo com essa definição, observa-se, na Tab. 2, que as estruturas revestidas por material viscoelástico dissiparam a mesma quantidade de energia.

Tab.2 – Características das frequências naturais quando o motor foi excitado com 2,4 Hz

Tipo	f_n (Hz)	Amplitude (V)	Largura de Banda (LB)	$\xi = \frac{2LB}{f_n}$
Estrutura 2	7,77	2,60	0,46	$118,4 \times 10^{-2}$
Estrutura 3	7,26	2,16	0,56	$154,2 \times 10^{-2}$
Estrutura 4	7,30	2,43	0,56	$153,4 \times 10^{-2}$

5.2.5 Comportamento quando o motor foi excitado com 3,7 Hz

De acordo com a Fig. 20, quando as estruturas foram excitadas com 3,7 Hz apresentaram os mesmos valores de frequências para os três modos ensaiados, tendo como particularidades:

- a estrutura 3 resultou em amplitudes mais altas para as frequências de 3,84 Hz e 7,69 Hz;
- a estrutura 4 apresentou amplitudes mais baixas para as frequências de 3,84 Hz e 7,69 e valores mais altos para as frequências de 11,5 Hz e 15,4 Hz;
- para as frequências de 11,5 Hz e 15,4 Hz, a estrutura 2 apresentou menores amplitudes.

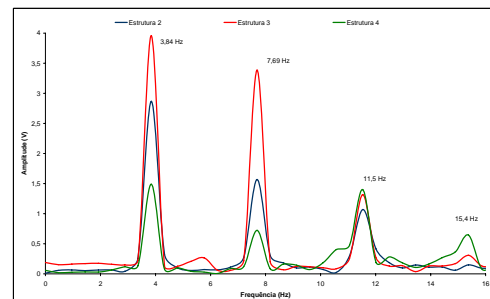


Fig. 20 – Comparação das respostas no domínio das frequências, para as estruturas 2, 3 e 4 quando o motor foi excitado com 3,7 Hz

5.3 - Análise da estrutura revestida com material viscoelástico e camada de restrição

5.3.1 Comportamento da Estrutura com Camada de Restrição em Movimento Livre

A Fig. 21 refere-se à análise temporal da estrutura 5 (estrutura com camada de espuma acrílica e com camada de restrição) que, depois de deslocada, cessou os movimentos em um intervalo de tempo de 2 segundos. Nesse sistema, a estrutura ficou mais rígida, o que pode ser comprovado com resposta no domínio da

freqüência mostrada na Fig. 22. Quando a estrutura foi ensaiada sem camada de material viscoelástico, a freqüência natural foi de 7,48 Hz; nesse ensaio passou para 9,93 Hz, e a largura de banda (LB) teve elevação de 0,39 Hz para 4,15 Hz.

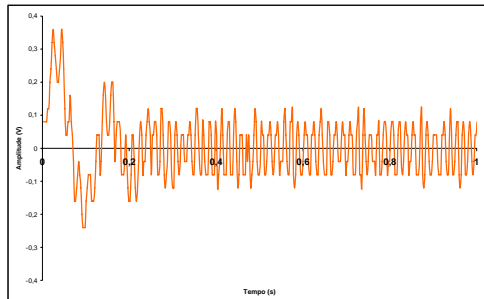


Fig. 21 – Resultado obtido no domínio do tempo para estrutura 5

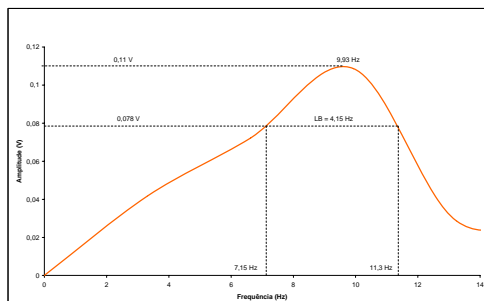


Fig. 22 – Resposta no domínio da freqüência para estrutura 5

5.3.2 Comportamento da Estrutura com Camada de Restrição em Movimento Forçado com o motor excitado em 2,2 Hz

A Fig. 23 ilustra um comparativo entre a estrutura 2 e a estrutura 5, quando o motor foi excitado com 2,2 Hz. Observa-se, de acordo com essa figura, que:

As primeiras freqüências apresentaram os valores de 2,4 Hz para as duas estruturas ensaiadas, com amplitude de 0,92 Volts para estrutura 2 e 0,32 Volts para a estrutura 5;

A estrutura 2 apresentou a maior amplitude no valor de 2,2 Volts para a freqüência de 7,21 Hz, enquanto o espectro da estrutura 5 apresentou amplitude de 0,13 Volts;

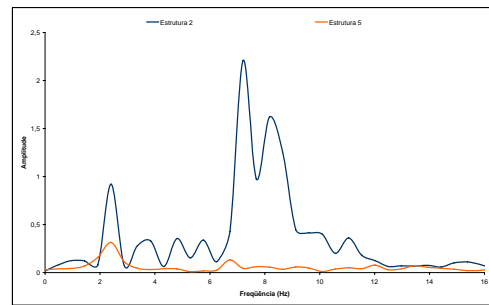


Fig. 23 – Comparação das respostas no domínio das freqüências, para as estruturas 2 e 5, quando o motor foi excitado com 2,2 Hz

5.4 - Atenuação das amplitudes de vibração

A Fig.2 ilustra o comportamento da estrutura ensaiada sem aplicação de material viscoelástico e na configuração viga sanduíche. Nota-se que a estrutura sem material viscoelástico apresentou amplitudes elevadas, as quais foram atenuadas consideravelmente quando ensaiada na configuração viga sanduíche.

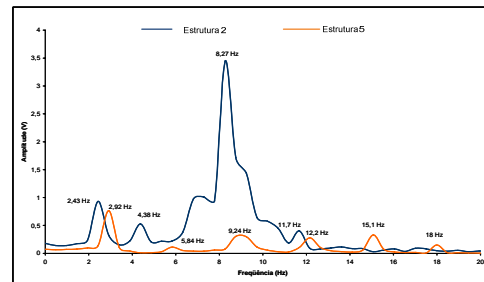


Fig. 2 – Comparação das respostas no domínio das freqüências, para as estruturas 2 (sem material viscoelástico) e 5 (configuração sanduíche), quando o motor foi excitado com 2,2 Hz

6- CONCLUSÃO

Com os resultados apresentados, comprovou-se que a estrutura flexível utilizada nas análises apresentou o mesmo comportamento para pontos diferentes da estrutura. Com as respostas no domínio do tempo e no domínio da freqüência, foi possível analisar que a única diferença nesse tipo de ensaio foi a amplitude, indicando valores maiores ou menores, tendo como relação a distância entre o elemento sensor (extensômetros) e o engaste.

As análises realizadas para a estrutura ensaiada na configuração camada livre apontou a espuma acrílica como

sendo o melhor absorvedor de vibração nos ensaios realizados em movimento livre. Em movimento forçado, o comportamento dinâmico das estruturas com diferentes revestimentos viscoelásticos resultou em diferentes funções de resposta em frequência resultando, portanto, em diferentes frequências naturais e diferentes fatores de amortecimento. Dessas análises, observou-se que a escolha do material viscoelástico a ser utilizado como mecanismo de amortecimento dependerá da frequência a qual se deseja atenuar as amplitudes, pois os fatores de amortecimento dos materiais viscoelásticos variavam de acordo com a frequência de excitação do motor.

Nos ensaios realizados com a configuração viga sanduíche, comprovou-se a importância da camada de restrição com as atenuações das amplitudes, observadas nos gráficos no domínio da frequência.

Essas análises permitiram uma compreensão da influência dos materiais viscoelásticos na natureza de vibração dessas estruturas.

7- REFERÊNCIAS

- CHEN, L.-H., HUANG, S.-C. "Vibration Attenuation of a Cylindrical Shell with Constrained Layer Damping Strips Treatment", *Computers & Structures*, v. 79, pp.1355-1362, 2001.
- CRANDALL, S. H. The Role of Damping in Vibration Theory. *Journal of Sound and Vibration*, 11 (1), pp. 3- 18, 1970.
- FAISCA, R.G. Caracterização de Materiais Viscoelásticos como Amortecedores Estruturais. Tese de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.
- FERRY, J. D. Viscoelastic properties of polymers. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1980
- Grinenko, N. I., Mokeev, V. V., "Analysis of the Dynamics of Inhomogeneous Viscoelastic Structures by the Finite-Element Method. *Mechanics of Composite Materials*", v.25, p.352-357, 1989
- INMAN, D. J., *Engineering Vibration*. Prentice Hall, 1996.
- JONES, D. I. G., *Handbook of Viscoelastic Vibration Damping*. John Wiley & Sons Ltd., Baffins Lane, Chichester, England, 2001.
- LAZAN, B. J. *Damping of Materials and Members in Structural Mechanics*. 1st ed. New York, Pergamon Press, 1968.
- OLIVEIRA, A. Adição de Amortecimento Estrutural Usando Materiais Viscoelásticos, Florianópolis. 157p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2006. p51.
- Pitella, B. D. A, "Investigação da Eficiência de Materiais Viscoelásticos para Redução de Vibrações em Risers", Pré requisitos para o acoplamento "Msc dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006
- Rao, V. S., Sun, C. T. & Sankar, B. V. "Finite Element Analysis of Prestressed Laminated Plates With Constrained Viscoelastic Damping Layer. *ASME – DOE Facilities Programs, Systems Interaction, and Active / Inactive Damping, PVP*" – v. 229, p. 147-154, 1992
- Rikards, R., Chate, A., Barkanov, E. "Finite Element Analysis of Damping the Vibrations of Laminated Composites". *Computers & Structures*, v. 47, p. 1005-1015, 1993.
- ROSS, D.; UNGAR, E.; KERWIN, E. Damping of Plate Flexural Vibrations by Means of Viscoelastic Laminate, *Structural Damping*, ASME, New York, USA, pp. 49-88, 1959.
- Sousa, E. A. C, "Métodos dos Elementos Finitos e elementos de contorno aplicados a problemas visco-elastodinâmicos transientes: Pré-requisitos para o acoplamento" Dr dissertação, Faculdade de Engenharia Mecânica of the Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brazil, 1999