

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS PARA CARACTERIZAÇÃO DE
MATERIAIS VISCOELÁSTICOS EM BAIXAS FREQUÊNCIAS

Rodrigo Pena Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Carlos Magluta, D.Sc.

Prof. Ney Roitman, D.Sc.

Prof. José Antônio Fontes Santiago, D.Sc.

Prof.^a Renata Gonçalves Faisca, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 2007

SILVA, RODRIGO PENA

Desenvolvimento de Metodologias Para
Caracterização de Materiais Viscoelásticos
em Baixas Frequências [Rio de Janeiro] 2007

xvii, 87 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Civil, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1. *Riser*
 2. Amortecimento Estrutural
 3. Material viscoelástico
 4. Viga sanduíche
- I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

DEDICATÓRIA

*Este trabalho é dedicado aos meus pais pelo exemplo
de amor incondicional dedicado aos filhos!*

AGRADECIMENTOS

A nossa vida é um aprendizado, feliz daquele que procura estudar para aprender o significado de estarmos neste mundo escola. Agradeço a Deus por esta oportunidade!

Algumas pessoas foram importantes para a concretização deste trabalho e, portanto, carinhosamente, agradeço:

- Aos meus queridos pais, Laércio de Oliveira e Silva e Silésia Pena Silva, pelo exemplo de educação dado aos filhos. Amo vocês!

- Ao meu querido avô, Adelino José Pena (*in memorium*), que deixou como herança valores morais a serem seguidos. À minha querida avó, Eny Gonçalves Pena, pelos ensinamentos valiosos que são sempre passados aos netos. Jamais esquecerei!

- Aos meus irmãos, Leonardo Pena Silva e Leandro Pena Silva, pela alegria de ser irmão de vocês!

- À minha tia Marilene, pelo carinho dado aos sobrinhos.

- À minha irmã de criação, Vera, e às minhas cunhadas Jocimara e Edinéia, pela força e pelos momentos felizes ao longo desses anos.

- Aos Professores, Ney Roitman e Carlos Magluta, pela dedicação, profissionalismo, paciência e ensinamentos ao longo deste trabalho. Obrigado!

- Aos amigos, Rodrigo Bahiense, Heric, Aluízio, Guto, Rômulo, Frederick, e Luiz Felipe, pela amizade, aprendizado e momentos inesquecíveis.

- Aos amigos da família Osório, Edu, Landa, Rodrigo, Dudu e Adriana, os quais sempre me ajudaram aqui no Rio com hospitalidade, boa vontade e atenção.

- Aos amigos de Mestrado, Aline, Serginho, Vanessa, Lilia, Valéria (Est.), Valéria (Geo.), Michele Sclebin e Prof. Sagrilo pelo apoio e companheirismo.

- Aos funcionários do Laboratório de Estruturas do PEC/COPPE, em especial, Flávio Sarquís, pela ajuda nos ensaios realizados neste trabalho. Obrigado!

- Aos colegas de COPPE, Gadea, Renata Faisca, Emerson, Bruno Pitela, Luiz (peruano), Fabrício e Daniel pelo apoio.

- Ao CENPES/PETROBRAS, pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS EM BAIXAS FREQUÊNCIAS

Rodrigo Pena Silva

Novembro/2007

Orientadores: Carlos Magluta
Ney Roitman

Programa: Engenharia Civil

Nas últimas décadas, têm-se projetado estruturas cada vez mais esbeltas, devido às novas técnicas de projeto e aos novos materiais empregados, passando estas estruturas a serem mais vulneráveis a cargas dinâmicas. Especialmente na indústria do Petróleo, os *risers* têm sido um dos principais problemas para o avanço na exploração em águas ultra-profundas.

Para os *risers* rígidos, o problema da dinâmica está principalmente relacionado às vibrações induzidas por vórtices, que podem conduzir a uma redução em sua vida útil devido à fadiga. Uma maneira de atenuar este problema seria aumentando o amortecimento destas estruturas, isto pode ser alcançado através da utilização de materiais viscoelásticos aplicado na estrutura de uma maneira especial conhecida como “vigas sanduíches”. Para que seja possível projetar esses sistemas, é fundamental caracterizar os materiais viscoelásticos que poderão ser utilizados nessas estruturas.

Esse trabalho visa desenvolver uma metodologia para caracterização de materiais viscoelásticos, ou seja, estimar módulo cisalhante (G) e fator de perda (η) desses materiais para uma faixa de frequência entre 0 a 10 Hz, já que a maioria das estruturas offshore possuem suas primeiras frequências naturais nesta faixa.

A metodologia desenvolvida será correlacionada com o método normalizado ASTM a fim de verificar sua precisão e eficiência.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DEVELOPMENT OF METHODOLOGYS FOR CHARACTERIZATION OF
VISCOELASTIC MATERIALS IN LOW FREQUENCIES

Rodrigo Pena Silva

November/2007

Advisors: Carlos Magluta

Ney Roitman

Department: Civil Engineering

On the last few decades has been designing structures even more slender, because of the new design techniques and to the new used materials, passing these structures to be more vulnerable to dynamics load. Especially in the petroleum industry, the risers have being one of the main problems to exploitate oil in ultra deep water.

For the steel risers the dynamic problems are mainly related to the vibrations induced by vortex which can lead into a reduction of its service life due to fatigue. A form to reduce this problem would be increasing the damping of these structures, that can be achieved through the application of viscoelastic materials applied in the structures of a special form know as “sandwich beams”. In order to be possible to design these systems, it’s very important to characterize the viscoelastic materials.

This work aims to develop a methodology for characterization of viscoelastic materials, i. e., it estimates the shear modulus and the loss factor for low frequencies.

The results obtained with the developed methodology are correlated with the normalized ASTM method in order to evaluate its precision and efficiency.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	1
1.2 ESTADO DA ARTE.....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	5
2. CONCEITOS BÁSICOS.....	6
2.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DA PERDA DE ENERGIA EM SISTEMAS ESTRUTURAIS COM AMORTECIMENTO.....	6
2.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS MATERIAIS VISCOELÁSTICOS (MVE'S) NO AMORTECIMENTO DE VIBRAÇÕES APLICANDO O CONCEITO DE VIGA SANDUÍCHE.....	9
2.3 PRINCIPAIS MÉTODOS UTILIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS.....	13
2.3.1 MÉTODO PADRÃO DA ASTM.....	13
2.3.2 MÉTODO DE ENSAIO DE RIGIDEZ COM APLICAÇÃO INDIRETA DA FORÇA.....	17
2.3.3 MÉTODO DE ENSAIO DE RIGIDEZ COM APLICAÇÃO DIRETA DA FORÇA.....	22
3. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DOS MATERIAIS VISCOELÁSTICOS PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS DE VIBRAÇÃO	26
3.1 ENSAIOS UTILIZANDO O MÉTODO PADRÃO DA ASTM	26
3.1.1 PRECAUÇÕES NA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PADRÃO DA ASTM	27
3.1.2 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS MODAIS UTILIZANDO AS VIGAS SIMPLES	28
3.1.3 CONFECÇÃO DAS VIGAS SANDUÍCHES.....	35
3.1.4 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS MODAIS DAS VIGAS SANDUÍCHES.....	39
3.1.5 RESULTADOS OBTIDOS DO MÓDULO CISALHANTE E FATOR DE PERDA APLICANDO O MÉTODO PADRÃO DA ASTM	41
3.2 MÉTODO DE ENSAIO DE RIGIDEZ COM APLICAÇÃO INDIRETA DA FORÇA.....	43
3.2.1 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL E DA INSTRUMENTAÇÃO	43
3.2.2 RESULTADOS OBTIDOS DO MÓDULO CISALHANTE E FATOR DE PERDA APLICANDO O MÉTODO INDIRETO.....	47
3.3 MÉTODOS DE ENSAIO DE RIGIDEZ COM APLICAÇÃO DIRETA DA FORÇA	49

3.3.1	DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO	50
3.3.2	RESULTADOS OBTIDOS PARA O MÓDULO CISALHANTE E FATOR DE PERDA APLICANDO O MÉTODO DIRETO.....	52
3.4	CARACTERIZAÇÃO ESTÁTICA DOS MATERIAIS VISCOELÁSTICOS	56
3.5	COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS UTILIZADOS	60
4.	VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE ALGUMAS CONCEPÇÕES DE VIGAS SANDUÍCHES.....	63
4.1	TIPOS DE CONCEPÇÕES DE VIGA SANDUÍCHE UTILIZADOS NOS ENSAIOS	64
4.2	AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS PARA O ACRÉSCIMO DE AMORTECIMENTO ESTRUTURAL ..	70
4.3	DESCRIÇÃO DOS TESTES E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS.....	72
5.	COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES.....	78
6.	REFERÊNCIAS.....	81
	APÊNDICE 1	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Sinal de vibração com amortecimento viscoso [3].....	7
Figura 2-2 – Energia dissipada por ciclo considerando a parcela elástica [3].....	8
Figura 2-3 – Tipos de elementos de tensão e deformação. (a) Tração e compressão e (b) Cisalhamento [3].	11
Figura 2-4 – Amortecedor viscoelástico por cisalhamento, (a) sistema amortecedor com uma camada, (b) sistema amortecedor com múltiplas camadas [3]. .	12
Figura 2-5 – Viga engastada e livre.....	14
Figura 2-6 – Viga sanduíche engastada e livre.....	15
Figura 2-7 – Esquema de montagem do Método de Ensaio de Rigidez com Aplicação Indireta da Força.....	18
Figura 2-8 – Esquema de Montagem do Método Direto.....	22
Figura 3-1 – Viga de alumínio confeccionada utilizada como engastada – livre.	29
Figura 3-2 – Esquema de montagem, instrumentação e aquisição de sinais utilizado para o ensaio com as vigas simples.	31
Figura 3-3 – Ensaio de vibração livre típico com a viga simples 2 tipo A ($V_2 - a$).	31
Figura 3-4 – Estratégia utilizada para excitação do segundo modo de vibração.	33
Figura 3-5 – Resultado obtido no domínio do tempo para a viga $V_5 - c$	34
Figura 3-6 – Tela típica do sistema utilizado [16] contendo os resultados da viga $V_5 - c$	34
Figura 3-7 – Resultado típico do ciclo de histerese do material viscoelástico...	36
Figura 3-8 – Descolamento do material viscoelástico das barras.....	38
Figura 3-9 – Placa para evitar o descolamento do material viscoelástico nas vigas sanduíches.	39

Figura 3-10 – Resultado obtido no domínio do tempo para a barra do tipo VS ₄ – c.	40
Figura 3-11 - Resultado obtido no domínio da frequência para a barra do tipo VS ₄ – c.	40
Figura 3-12 – Módulo cisalhante G do material VHB.	42
Figura 3-13 – Fator de perda η para o material VHB.	42
Figura 3-14 – Montagem do aparato experimental para ensaio utilizando o Método Indireto.	44
Figura 3-15 – Caixa de alumínio utilizada no ensaio do Método Indireto.	45
Figura 3-16 – Esquema de montagem utilizado no ensaio do Método Indireto.	47
Figura 3-17 – Módulo cisalhante G do material VHB.	47
Figura 3-18 – Fator de perda η para o material VHB.	48
Figura 3-19 – Módulo cisalhante G do material VHB - massa total de 4250 g.	49
Figura 3-20 – Fator de perda η do material VHB - massa total de 4250 g.	49
Figura 3-21 – Aparato experimental utilizado no Método Direto.	50
Figura 3-22 – Esquema de montagem do ensaio do Método Direto.	51
Figura 3-23 – Módulo cisalhante G do material VHB submetido a vibrações aleatória e harmônica.	52
Figura 3-24 – Fator de perda η do material VHB submetido a vibrações aleatória e harmônica.	52
Figura 3-25 – Módulo Cisalhante G do material VHB para o comprimento l duplicado.	53
Figura 3-26 – Fator de Perda η do material VHB para o comprimento l duplicado.	54
Figura 3-27 – Módulo Cisalhante G do material VHB para a espessura h duplicada.	55
Figura 3-28 – Fator de Perda η do material VHB para a espessura h duplicada.	55
Figura 3-29 – Ensaio de fluência realizado com o material VHB.	58

Figura 3-30 – Rigidez estática do material VHB utilizando o trecho de carregamento.	59
Figura 3-31 – Módulo Cisalhante G estático do material VHB.	59
Figura 3-32 – Comparações do Módulo Cisalhante G do material VHB.....	60
Figura 3-33 – Comparações do Fator de Perda η do material VHB.....	61
Figura 4-1 – Tipos de concepções de viga sanduíche.	64
Figura 4-2 – Resultado obtido no domínio do tempo para a barra VS ₄ – c / T2.	66
Figura 4-3 – Resultado obtido no domínio da frequência para a barra VS ₄ – c / T2.....	66
Figura 4-4 – Taxa de amortecimento das concepções T1, T2 e T3 - primeiro modo de vibração.	68
Figura 4-5 - Taxa de amortecimento das concepções T1, T2 e T3 - segundo modo de vibração.	69
Figura 4-6 – Estratégia utilizada para o ganho de amortecimento.	70
Figura 4-7 – Esquema de testes realizados nas vigas sanduíches.....	72
Figura 4-8 - Resultado obtido no domínio do tempo para a barra VS ₄ – c / T4.	73
Figura 4-9 - Resultado obtido no domínio da frequência para a barra VS ₄ – c / T4.....	74
Figura 4-10 - Resultados obtidos referentes ao primeiro modo de vibração, para a viga sanduíche concepção tipo 4, teste 1.	75
Figura 4-11 - Resultados obtidos referentes ao segundo modo de vibração, para a viga sanduíche concepção tipo 4, teste 1.....	76

LISTA DE FOTOS

Foto 3-1 – Detalhe do engaste e do sensor sem contato.....	30
Foto 3-2 – Primeira etapa - Aplicação da camada de material viscoelástico.	37
Foto 3-3 – Segunda etapa - VHB 4955 aderido na barra para a fixação do outro par de barra.	37
Foto 3-4 – Etapa final - viga sanduíche confeccionada.....	38
Foto 3-5 – Viga sanduíche engastada utilizando a placa para evitar o descolamento do amortecedor.	39
Foto 3-6 –Visão geral do ensaio.....	44
Foto 3-7 – Detalhe da massa adicionada no interior da caixa de alumínio.	46
Foto 3-8 – Vista do ensaio do Método Direto.	51
Foto 3-9 – Vista da caixa com a duplicação da espessura h e do comprimento l do material VHB.....	55
Foto 3-10 – Montagem do ensaio de fluência do material VHB.....	57
Foto 3-11 – Detalhe da instalação dos pesos.....	57
Foto 4-1 – Vigas sanduíche sem base de engaste.....	65
Foto 4-2 – Viga sanduíche sem base de engaste e sem continuidade na camada de restrição.....	65
Foto 4-3 – Linha de furos 2 e 3 (vide figura 4-8) rosqueadas para travamento da camada de restrição.	71
Foto 4-4 – Aplicação dos parafusos de travamento na linha de furos 1 (vide figura 4-8).....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Características das vigas simples utilizadas nos ensaios.	29
Tabela 3-2 - Parâmetros modais das vigas simples obtidos nos ensaios de vibrações livres.	32
Tabela 3-3 - Parâmetros modais do segundo modo de vibração estimados através da técnica STFT.	35
Tabela 3-4 – Características das vigas sanduíche e do material amortecedor utilizado.	36
Tabela 3-5 – Frequências Naturais e taxas de amortecimento obtidas dos ensaios com as vigas sanduíches.	41
Tabela 3-6– Valor médio e desvio padrão de G e η para o material viscoelástico na faixa de frequência, entre 0 e 10 Hz, das vigas simples.	41
Tabela 4-1 – Resultados obtidos para os três tipos de concepções de viga sanduíche.	67
Tabela 4-2 – Resultados obtidos para as vigas sanduíches 2, 4 e 6 da concepção T4.	75

LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

F_d – força de amortecimento.

c – constante de proporcionalidade chamada de coeficiente de viscosidade ou de amortecimento viscoso.

dx / dt – velocidade da partícula relativa ao fluido.

W_d – energia dissipada por ciclo de oscilação.

X – amplitude de resposta.

ω – frequência de excitação.

φ – ângulo de fase entre a força de excitação e a resposta.

T – período de oscilação.

$\text{Área}_{\text{elipse}}$ – área da elipse de *Lissajoux*.

kx – parcela elástica da rigidez.

κ – ângulo de rotação da elipse de *Lissajoux*.

A – área da elipse de *Lissajoux*.rotacionada.

e_1 – maior semi-eixo da elipse de *Lissajoux*.rotacionada.

e_2 – menor semi-eixo da elipse de *Lissajoux*.rotacionada.

U – energia potencial (energia estocada).

η – fator de perda.

ξ – taxa de amortecimento.

X_n – amplitude do " n – ésimo " ciclo.

X_{n+N} – amplitude do " $(n + N)$ ésimo " ciclo.

F_c – força de amortecimento de Coulomb.

N – força normal atuante entre duas superfícies.

μ_a – coeficiente de atrito.

σ – tensão.

ε – deformação.

a, b – constantes.

t – tempo.

E – módulo de elasticidade longitudinal.

E' – módulo de armazenamento.

E'' – módulo de perda.

E^* – módulo de elasticidade complexo.

G – módulo de elasticidade transversal ou cisalhante.

G' – módulo de armazenamento cisalhante.

G^* – módulo de elasticidade cisalhante complexo.

η_e – fator de perda extensional.

L – comprimento inicial.

H – largura ou espessura.

S – área da seção transversal.

V – volume.

ΔL – variação do comprimento.

ΔH – variação da largura.

ΔV – variação do volume.

ν – coeficiente de Poisson.

σ_s – tensão cisalhante.

ε_s – deformação por cisalhamento ou cisalhante.

σ_e – tensão extensional.

ε_e – deformação extensional.

η_s – fator de perda cisalhante.

H_1 – espessura da camada da estrutura.

H_2 – espessura da camada de material viscoelástico.

H_3 – espessura da camada de restrição.

E_1 – módulo de elasticidade longitudinal da camada da estrutura.

E_2 – módulo de elasticidade longitudinal da camada de material viscoelástico.

E_3 – módulo de elasticidade longitudinal da camada de restrição.

η_1 – fator de perda da camada da estrutura.

η_2 – fator de perda da camada de material viscoelástico.

η_3 – fator de perda da camada de restrição.

x – eixo longitudinal.

z – eixo transversal.

u – deslocamento longitudinal

w – deslocamento transversal.

u_1 – deslocamento longitudinal da camada da estrutura.

u_3 – deslocamento longitudinal da camada de restrição.

d – distância entre a linha média da camada da estrutura e a linha média da camada de restrição.

γ – deformação por cisalhamento ou cisalhante da camada de material viscoelástico.

τ – tensão de cisalhamento ou cisalhante da camada de material viscoelástico.

S_1 – força cisalhante atuante na camada da estrutura.

S_2 – força cisalhante atuante na camada de material viscoelástico.

S_3 – força cisalhante atuante na camada de restrição.

D_1 – rigidez à flexão da camada da estrutura.

D_3 – rigidez à flexão da camada de restrição.

D_t – rigidez à flexão total da viga sanduíche.

M_t – momento fletor total atuante na seção XX da viga sanduíche.

S_t – força cisalhante total atuante na seção XX da viga sanduíche.
 M_1 – momento fletor atuante na camada da estrutura.
 M_3 – momento fletor atuante na camada de restrição.
 P_1 – força longitudinal atuante na camada da estrutura.
 P_3 – força longitudinal atuante na camada de restrição.
 p – carga transversal atuante na viga sanduíche.
 n e Y – símbolos auxiliares.
 δx – elemento da camada da estrutura (inferior).
 $q(x, t)$ – carga dinâmica externa.
 m – massa por unidade de comprimento total do sistema viga sanduíche.
 EI – rigidez à flexão do sistema de três camadas.
 I – momento de inércia.
 I_1 – momento de inércia da estrutura.
 D – distância do eixo neutro do sistema de três camadas ao da viga original.
 g – parâmetro de cisalhamento.
 a_n – função da condição de contorno para cada modo de uma viga de seção uniforme e com carga uniformemente distribuída.
 h_2 – razão entre a espessura da camada de material viscoelástico (H_2) e a camada da estrutura (H_1).
 h_3 – razão entre a espessura da camada de restrição (H_3) e a camada da estrutura (H_1).
 Ay / D_r – amplitude adimensional.
 Ay – amplitude de vibração.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação do Trabalho

Atualmente, com a descoberta de novos campos de petróleo em águas ultra-profundas, os *risers* passam a serem mais vulneráveis a cargas dinâmicas e portanto têm sido um dos principais problemas para se avançar na exploração em águas profundas.

Para os risers rígidos o problema da dinâmica está principalmente relacionado às vibrações induzidas por vórtices (VIV), as quais podem conduzir a uma redução em sua vida útil devido à fadiga. As VIV têm sido consideradas um dos principais desafios no projeto de *risers* e de estruturas expostas a correntes marinhas. Existem algumas soluções possíveis, como por exemplo, os *strakes*, que são supressores de vórtices utilizados para quebrar o sincronismo de desprendimento de vórtices. No entanto, esse tipo de solução apresenta um elevado custo, dificultando sua utilização na prática.

Outra maneira de atenuar este problema seria aumentando o amortecimento destas estruturas, o que poderia ser alcançado através da utilização de materiais viscoelásticos (MVE). Estes materiais apresentam ciclos de histerese com grande perda de energia e podem ser utilizados entre a estrutura e uma camada de restrição. Este sistema amortecedor é normalmente denominado como “viga sanduíche”, conforme já foi abordado na literatura técnica [1] e nas dissertações de Mestrado de FAISCA [2] e PITELA [3], conduzindo a um aumento expressivo da taxa de amortecimento.

Para o caso de *risers* esta solução poderia ser, por exemplo, aplicada através do conceito *pipe-in-pipe*, onde o material viscoelástico seria utilizado entre os dois tubos. Além disso, essa concepção também poderia trazer como vantagem o isolamento térmico do óleo do interior do *riser*, o que poderia reduzir o esfriamento do mesmo diminuindo a deposição de parafina no seu interior. Outra possibilidade seria a utilização do material viscoelástico para a proteção contra a oxidação dos *risers* na indústria do petróleo.

Para que seja possível projetar esses sistemas, é fundamental caracterizar os materiais viscoelásticos que poderão ser utilizados nessas estruturas.

Esse trabalho visa desenvolver uma metodologia para caracterização de

materiais viscoelásticos, ou seja, estimar o módulo cisalhante (G) e o fator de perda (η) desses materiais para a faixa de frequência entre 0 a 10 Hz, já que a maioria das estruturas *offshore* possuem frequências naturais de interesse nesta faixa de frequência. Outra motivação para este trabalho está relacionada ao fato da maioria das aplicações encontradas na literatura técnica estarem direcionadas a estruturas com frequências mais elevadas.

1.2 Estado da Arte

Os estudos sobre as propriedades de amortecimento de materiais para a engenharia iniciaram-se por volta de 1784, quando Coulomb provou, através de ensaios experimentais, que o amortecimento em oscilações torcionais não é causado pelo atrito do ar, mas pela dissipação de energia interna do material [4].

Durante o século passado cientistas e engenheiros mostraram-se interessados na capacidade de amortecimento de polímeros, elastômeros e outros materiais não metálicos. Inicialmente houve um maior interesse no amortecimento do material, e posteriormente, foi dada maior ênfase ao amortecimento como propriedade dinâmica da estrutura.

Na década de 50, iniciaram-se os primeiros estudos onde os materiais viscoelásticos eram usados como materiais amortecedores de vibração estrutural. Foram realizados alguns trabalhos nesse sentido, podendo ser referenciados os realizados por Kerwin [5] e Ross, Kerwin e Ungar [6], os quais utilizaram materiais viscoelásticos em lâminas que vibravam a flexão. Também podem ser citados os trabalhos de Oberst e K. Frankenfeld [7], os quais fundamentaram o Método Padrão da ASTM. Este método é bastante utilizado atualmente para caracterização de materiais viscoelásticos, e foi utilizado neste trabalho como uma das técnicas para caracterização de materiais viscoelásticos, conforme será mostrado no capítulo 3 deste trabalho.

O fato da aplicação dos materiais viscoelásticos estarem presente nos diversos setores da indústria, fez com que, atualmente, sejam realizados muitos estudos a fim de se aprofundar em formulações e modelos numéricos para descrever o comportamento deste mecanismo de amortecimento. Na indústria automotiva, R. Deng, P. Davies e A. K. Bajaj (2003) [8] realizaram 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.

Nessa mesma linha, R. Singh, P. Davies, e A. K. Bajaj (2003) [9] realizaram um trabalho que visa estimar as propriedades dinâmicas desse material (espuma poliuretana) através do uso da Série de Prony.

Alguns trabalhos mais recentes têm utilizado o método inverso para caracterização desses materiais, como é o caso do trabalho desenvolvido por Y. Shi, H.

Sol, e H. Hua (2006) [10]. Esse trabalho consiste em estimar experimentalmente as frequências de ressonância do espécime ensaiado, e refinar, iterativamente, os parâmetros dinâmicos, através de um modelo de elementos finitos dos espécimes utilizados, de tal forma que seja minimizada a diferença entre as frequências naturais calculadas e as medidas. Nessa mesma linha, cabe citar a tese de Doutorado de CASTELLO (2004) [11], na qual a solução do problema é dada pela minimização de uma função erro que inclui tanto os dados do experimento quanto os dados do modelo utilizado para representar o sistema. Esse trabalho baseia-se nas variáveis de estado internas para a construção das equações constitutivas dos materiais viscoelásticos.

No Programa de Engenharia Civil da COPPE, nessa mesma linha de pesquisa, sobre caracterização de materiais viscoelásticos, destaca-se o trabalho de FAISCA (1998) [2], o qual estudou a obtenção das propriedades desses materiais, aplicando os métodos da ASTM, direto e indireto.

Na linha de pesquisa sobre a utilização de materiais viscoelásticos como atenuadores de vibração, foram realizados outros trabalhos na COPPE, podendo-se citar o realizado na dissertação de Mestrado de PITELA (2006) [3], o qual investiga algumas alternativas para aumentar o amortecimento de *risers* rígidos aplicando materiais viscoelásticos como amortecedores de vibrações. Na dissertação de Mestrado de SANTOS (2003) [12], as propriedades e o desempenho de um tipo de mecanismo de controle passivo em edifícios altos, aplicando amortecedores com características viscoelásticas, é investigado, e na tese de Doutorado de BARBOSA (2000) [13], uma modelagem computacional de estruturas acopladas com camadas viscoelásticas visando o amortecimento é proposta.

1.3 Organização do Texto

O texto deste trabalho está dividido em capítulos, estruturados na seqüência apresentada a seguir.

O capítulo 2 apresenta uma breve descrição da classificação dos tipos de amortecimento em estruturas, assim como a sua caracterização em sistemas amortecidos. São apresentados os principais fundamentos sobre a utilização de materiais viscoelásticos aplicando o conceito de viga sanduíche e como são estimadas as frequências naturais e as taxas de amortecimento dessas estruturas e das vigas simples, através da técnica de análise Short Time Fourier Transform (STFT) [16]. A seguir, é apresentada a teoria referente à caracterização de propriedades de materiais viscoelásticos através de três métodos especiais, os quais são: Método Padrão da ASTM, Método com Aplicação Indireta da Força e o Método com Aplicação Direta da Força.

O capítulo 3 apresenta a descrição dos ensaios aplicando os métodos distintos para a caracterização dos materiais viscoelásticos, mostrando todo esquema de montagem dos aparatos ensaiados, equipamentos e sensores utilizados. Na seqüência é realizada a caracterização estática do material viscoelástico, onde os dados obtidos nos ensaios foram utilizados para estimar o módulo cisalhante estático, sendo importante para correlacioná-lo com a curva do módulo cisalhante dinâmico, obtida, aplicando-se o Método Direto.

O capítulo 4 apresenta uma verificação experimental de algumas concepções de vigas sanduíche, a fim de avaliar suas eficiências e aplicações em estruturas reais. Tal verificação é composta por três tipos de concepções de vigas sanduíches, sendo que em cada uma é estimada a taxa de amortecimento e a frequência natural, através da técnica STFT [16].

Finalmente, o capítulo 5 apresenta os comentários finais sobre as análises realizadas e são propostas algumas sugestões para serem desenvolvidas em trabalhos futuros.

2. CONCEITOS BÁSICOS

Neste capítulo, inicialmente, são introduzidos os conceitos básicos associados aos principais temas tratados nesta dissertação. No item 2.1 é apresentado um rápido resumo sobre amortecimento em estruturas e sobre a técnica de processamentos de sinais utilizada neste trabalho para a estimativa das frequências naturais e das taxas de amortecimento.

No item 2.2, destacam-se os princípios da utilização dos materiais viscoelásticos como elementos amortecedores para uma configuração de um mecanismo controlador de vibrações em estruturas, baseados nas análises desenvolvidas por RKU (*Ross-Kerwin-Ungar*), conforme apresentado por NASHIF et al. [1] e na dissertação de Mestrado de PITELA (2006) [3]. Tal alternativa baseia-se na utilização de vigas sanduíche, a qual já foi referenciada na literatura técnica [1] e em uma dissertação de Mestrado [2], desenvolvida no Laboratório de Estruturas da COPPE.

No item 2.3, são apresentados três métodos especiais para a obtenção experimental das características dos materiais viscoelásticos (MVE) para uma faixa de frequência entre 0 e 10 Hz. Esses parâmetros contribuem para o estudo do amortecimento de estruturas, conduzindo a análise e ao estudo de uma alternativa viável para o incremento da taxa de amortecimento estrutural.

2.1 Características Principais da Perda de Energia em Sistemas Estruturais com Amortecimento

O objetivo deste item é apresentar um resumo de algumas características associadas ao amortecimento estrutural, uma vez que um dos principais objetivos da utilização dos materiais viscoelásticos é controlar as vibrações aumentando a capacidade da estrutura em dissipar a energia, i. é, aumentando o amortecimento.

O amortecimento é conceituado como sendo a dissipação de energia durante o processo de movimentos oscilatórios. Quando a estrutura é colocada em vibração livre, a consequência dessa perda de energia está na diminuição da amplitude de vibração ao longo do tempo até chegar no instante em que o movimento vibratório cesse por completo. Esta situação pode ser observada na figura 2-1 para o amortecimento do tipo

viscoso, i. é, proporcional a velocidade. Por outro lado uma estrutura submetida a excitação forçada apresentará amplitudes menores quanto maior for o seu amortecimento.

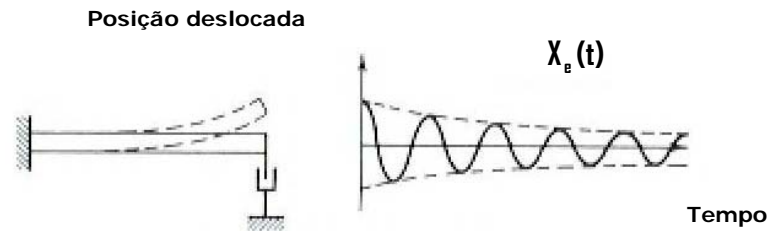


Figura 2-1 - Sinal de vibração com amortecimento viscoso [3].

Uma forma mais genérica para descrever o amortecimento é através da energia perdida por ciclo. Para um sistema amortecido a energia dissipada por ciclo de oscilação (W_d) pode ser definida como sendo o trabalho realizado pela força de amortecimento por ciclo dado pela equação a seguir:

$$W_d = \oint F_d \cdot dx \quad (2.1)$$

A relação gráfica da força de amortecimento (F_d) versus a amplitude de deslocamentos (x) resulta na representação das elipses de *Lissajoux* quando a estrutura é excitada por uma força harmônica. Estas curvas elípticas são chamadas de ciclos de histerese, onde a área interna a este ciclo representa a energia de dissipação (W_d) por ciclo de oscilação de um sistema estrutural, conforme ilustrado na figura 2-2.

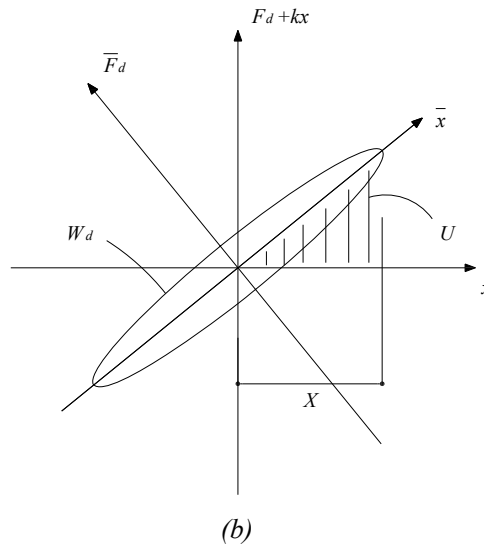


Figura 2-2 – Energia dissipada por ciclo considerando a parcela elástica [3].

O valor do amortecimento também pode ser definido em função da energia de dissipação (W_d) e da energia potencial (U), dado pela expressão:

$$\eta = \frac{W_d}{2 \cdot \pi \cdot U} \quad (2.2)$$

onde $U = \frac{k \cdot x^2}{2}$ é a energia potencial (energia estocada), W_d é a energia dissipada e η é definido como sendo a razão entre a energia dissipada por radiano e a energia potencial ou estocada, a qual pode ser representada pela área do triângulo (área hachurada) na figura 2-2.

Assumindo-se que o amortecimento é do tipo viscoso, este pode ser caracterizado diretamente através da taxa de amortecimento, a qual é dada pela seguinte fórmula:

$$\xi = \frac{W_d}{4 \cdot \pi \cdot U} = \frac{\eta}{2} \quad (2.3)$$

Os ciclos de histerese, como foram vistos, podem ser usados para quantificar propriedades de amortecimento de materiais, também são muito úteis no entendimento do amortecimento de um sistema estrutural. No caso de materiais convencionais, como por exemplo, aço e alumínio, os ciclos de histerese são muito estreitos, o que dificulta a sua observação. Já no caso de materiais compostos, os ciclos de histerese são mais largos, facilitando assim a sua observação, conforme mostrado na tese de Mestrado de FAISCA (1998) [2].

Na prática existem várias técnicas para estimar a taxa de amortecimento e também a frequência natural de vibração. Neste trabalho foram utilizadas as técnicas de decremento logarítmico e a STFT [16]. A primeira, decremento logarítmico [14] e [15], é uma técnica de estimativa da taxa de amortecimento associada somente ao 1º modo de vibração, considerada na literatura técnica, como sendo uma das mais confiáveis dentre as existentes, porém bastante limitada.

Tendo em vista que a técnica do decremento logarítmico apresenta uma limitação em relação a estimativa das características dinâmicas dos outros modos presentes no sinal, foi necessária a utilização de uma segunda técnica, STFT, a qual permite a identificação da frequência natural e da taxa de amortecimento de todos os modos existentes no sinal. Esta técnica baseia-se na transformada Tempo-Frequência e a implementação utilizada foi desenvolvida na tese de Doutorado de BUCHER (2001) [16].

2.2 Características Principais dos Materiais Viscoelásticos (MVE'S) no Amortecimento de Vibrações Aplicando o Conceito de Viga Sanduíche

A principal função dos materiais viscoelásticos aplicados entre a estrutura e a camada de restrição é contribuir no aumento da taxa de amortecimento dessas estruturas não tendo, com isso, função estrutural. Em vista disso, a caracterização da perda de energia de materiais viscoelásticos é importante para a obtenção desse incremento na taxa de amortecimento. Entretanto, para caracterizar essa perda de energia, é natural adotar modelos, tais como: o modelo de Maxwell, o modelo de Voigt e o modelo Linear Padrão, entre outros descrevem o comportamento de materiais viscoelásticos e são

descritos em detalhes na literatura técnica [17] e na dissertação de Mestrado de FAISCA (1998) [2].

Estes modelos de um modo geral consideram o elemento elástico modelado por uma mola linear e elemento viscoso modelado por um amortecedor, sendo, portanto, o modelo viscoelástico uma combinação de molas lineares e amortecedores.

Estes modelos descrevem as relações constitutivas de materiais viscoelásticos expressas no domínio do tempo, utilizando-se para isso integrais de convolução ou equações diferenciais.

Um dos objetivos na caracterização de materiais viscoelásticos é estimar a perda de energia por ciclo que pode ser definida através do fator de perda " η " (vide equação 2.2). Segundo NASHIF *et al* [1], o fator de perda também representa as relações constitutivas de materiais viscoelásticos, expressas entre a tensão (σ) e a deformação (ϵ), que conduzidas ao domínio da frequência, resultam na equação:

$$\eta = \frac{E''}{E'} \quad (2.4)$$

onde, E' e E'' são denominados de módulo de armazenamento e módulo de perda, respectivamente, e são definidos diretamente no domínio da frequência. Entretanto, a determinação de E' e E'' deve ser feita, experimentalmente, para cada material individualmente.

Conforme apresentado na dissertação de Mestrado de PITELA (2006) [3], os materiais viscoelásticos, mantêm a mesma relação entre o módulo extensional (E) e o módulo de cisalhamento (G) (vide figura 2-3), isto é:

$$E' = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G' \quad (2.5)$$

onde, ν representa o coeficiente de Poisson.

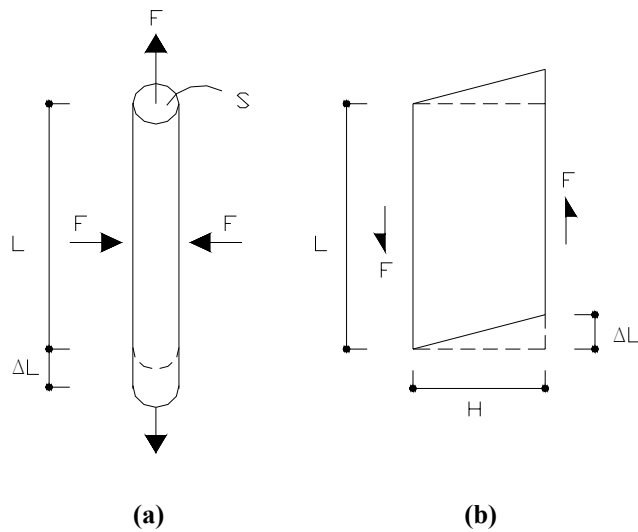


Figura 2-3 – Tipos de elementos de tensão e deformação. (a) Tração e compressão e (b) Cisalhamento [3].

De maneira semelhante ao módulo de elasticidade, o módulo de cisalhamento (G) também é representado no domínio da frequência como um número complexo, ($G^* = G + i\eta G$), onde a parcela real representa a rigidez do material viscoelástico e razão entre as parcelas imaginária e real representa o fator de perda. Ressalta-se que ambas as parcelas, real e imaginária, do módulo cisalhante complexo são dependentes da frequência.

O material viscoelástico, quando associado a estrutura principal, pode ser submetido à deformação extensional ou ao cisalhamento, dependendo da forma com que ele é aplicado. No caso extensional o material viscoelástico é fixado sobre a superfície da estrutura sendo sua eficiência, de um modo geral, bastante reduzida, e portanto, não foi objeto de estudo neste trabalho.

A estratégia que força um comportamento do MVE ao cisalhamento é bastante referenciada na literatura técnica pelo nome de vigas sanduíche, a qual consiste pela interação de um sistema de pelo menos três camadas: a estrutura, o material viscoelástico e a camada de restrição. A configuração deste sistema de camadas sobrepostas formando um sanduíche é mostrada na figura 2-4, onde também se observa que esta concepção pode ser estendida para um sistema amortecedor com múltiplas

camadas sanduíche, isto é, com mais de uma camada de material amortecedor e de restrição.

O funcionamento do amortecedor do tipo viga sanduíche é dado pela atuação da camada de restrição sobre o material amortecedor, deformando-o por cisalhamento quando a estrutura é submetida à flexão. Geralmente, utiliza-se para a camada de restrição o mesmo material da estrutura, sendo rígida suficiente para acompanhar os movimentos vibratórios da estrutura e promover a deformação do material amortecedor. Assim, esta deformação ocorrida na camada do material amortecedor implicará na dissipação de energia de vibração, e o conseqüente aumento do amortecimento do sistema estrutural.

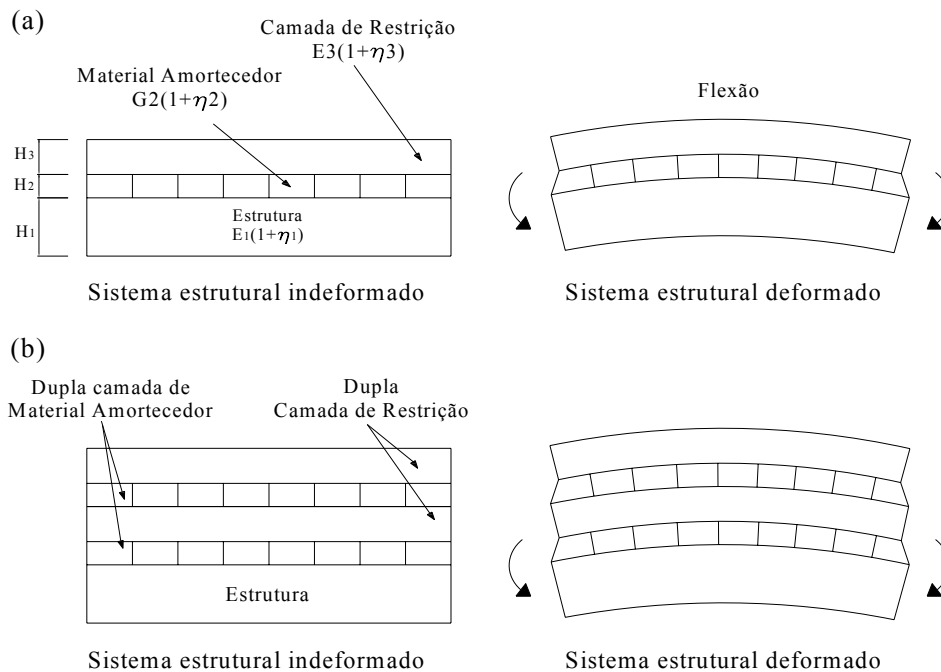


Figura 2-4 – Amortecedor viscoelástico por cisalhamento, (a) sistema amortecedor com uma camada, (b) sistema amortecedor com múltiplas camadas [3].

Na literatura técnica encontram-se diversos trabalhos que apresentam estratégias para análise deste tipo de estrutura, dentre elas uma das mais conhecidas é a metodologia conhecida por RKU (Ross-Kerwin-Ungar) apresentada por NASHIF *et al* [1]. A partir desta metodologia é possível desenvolver modelos teóricos que descrevem o comportamento das vigas sanduíches. Através desta formulação pode-se estabelecer

uma série de relações entre os parâmetros físicos e geométricos dos elementos estruturais, tais como: a espessura das camadas (estrutura, MVE e restrição), o fator de perda, o módulo de cisalhamento e a temperatura. Ressalta-se que neste trabalho as relações que envolvem a variação de temperatura não foram levadas em consideração, sendo somente utilizada a temperatura ambiente durante os testes experimentais. Neste trabalho o principal foco foi desenvolver metodologias de caracterização de materiais viscoelásticos e análise de comportamento de vigas sanduíches para a faixa de frequência de 0 a 10 Hz.

2.3 Principais Métodos utilizados para a Determinação das Propriedades de Materiais Viscoelásticos

Neste trabalho foram utilizados três tipos de estratégias para a caracterização de materiais viscoelásticos, sendo utilizado como referência a dissertação de Mestrado de FAISCA (1998) [2], as normas que descrevem o método normalizado pela “American Society for Testing and Materials” – ASTM [18] e do método desenvolvido por P. A. Masterson e R. N. Miles [19].

A caracterização dos materiais viscoelásticos se dá através do módulo cisalhante, G , que caracteriza a energia armazenada do material viscoelástico e fator de perda, η , que caracteriza a energia dissipada do material viscoelástico.

Adicionalmente também foram realizados testes estáticos, que consistiram na aplicação de um carregamento estático controlado e na medição do deslocamento ao longo do tempo. O principal objetivo para a realização destes testes foi estimar o módulo de cisalhamento estático do material viscoelástico, mas também foi possível verificar através destes testes a fluência do material utilizado.

2.3.1 Método Padrão da ASTM

Este método é normalizado pela “American Society for Testing and Materials” – ASTM [18] e é conhecido como Método de teste Padrão para Medição das Propriedades de Materiais Amortecedores de Vibração.

A montagem utilizada nesse método é composta por uma lâmina metálica com dimensões previamente definidas, engastada em uma extremidade e livre na outra, simulando uma viga conforme a figura 2-5

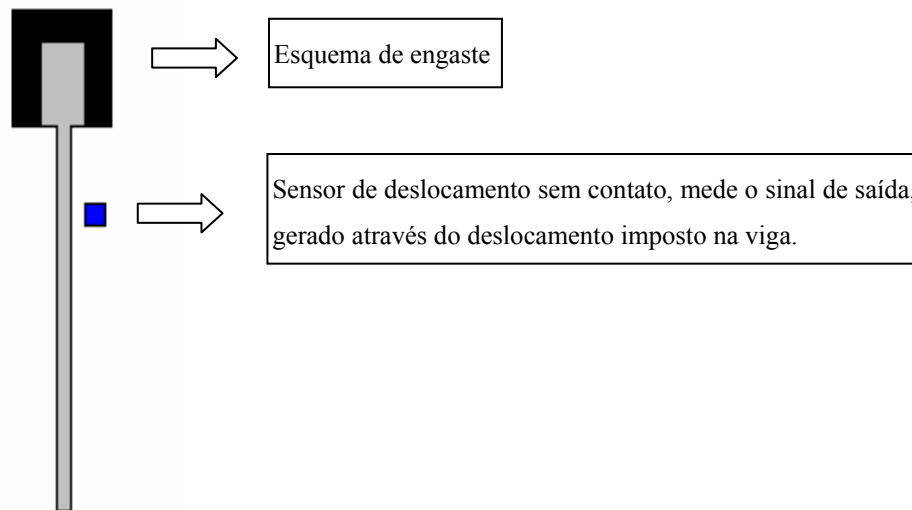


Figura 2-5 – Viga engastada e livre.

Para a obtenção das propriedades dos materiais viscoelásticos (módulo cisalhante, G , e o fator de perda, η) é necessário estimar as frequências naturais e as taxas de amortecimento da viga simples e sanduíche. A viga sanduíche, neste caso, é obtida utilizando-se uma composição de duas vigas simples conectadas através do material viscoelástico, conforme é ilustrado na figura 2-6.

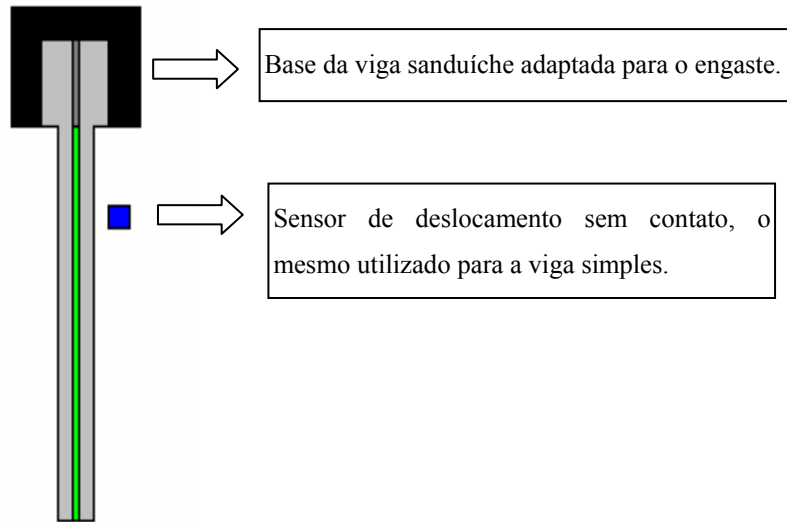


Figura 2-6 – Viga sanduíche engastada e livre.

Para estimar as propriedades dinâmicas, a estrutura foi submetida a impactos e sua resposta medida por um sensor sem contato. A partir da resposta medida, as frequências naturais e as taxas de amortecimento, referentes aos primeiros modos de vibração, foram estimadas, aplicando a técnica STFT, conforme apresentado no ítem 2.1. Para efeito de comparação foi utilizada a técnica do decremento logarítmico, sendo que neste caso a estrutura foi excitada através de um deslocamento imposto, a fim de reduzir a energia imposta aos modos mais altos.

Por fim, através dos dados de frequência natural de vibração e taxa de amortecimento, as propriedades do material viscoelástico foram estimadas através das equações (2.6) e (2.7):

$$G_{2n} = \frac{(A - B) - 2(A - B)^2 - 2(A\eta_n)^2}{(1 - 2A + 2B)^2 + 4(A\eta_n)^2} \times \frac{E_1 H_1 H_2 a_n}{L^2} \quad (2.6)$$

$$\eta_{2n} = \frac{A\eta_n}{A - B - 2(A - B)^2 - 2(A\eta_n)^2} \quad (2.7)$$

Onde,

$$A = \left(\frac{\omega_n}{\omega_{1n}} \right)^2 (2 + \rho_r h_2) \left(\frac{B}{2} \right) \quad (2.8)$$

$$B = \frac{1}{6(1 + h_2)^2} \quad (2.9)$$

$$\rho_r = \rho_2 / \rho_1 \quad (2.10)$$

$$h_2 = H_2 / H_1 \quad (2.11)$$

G_{2n} : módulo cisalhante do material amortecedor associado ao enésimo modo;

η_{2n} : fator de perda do material amortecedor associado ao enésimo modo;

η_n : fator de perda da estrutura composta associado ao enésimo modo;

E_1 : módulo de elasticidade do material da estrutura simples;

H_2 : espessura do material amortecedor;

H_1 : espessura do material da estrutura simples;

ρ_2 : densidade do material amortecedor;

ρ_1 : densidade do material da estrutura simples;

ω_{1n} : enésima frequência angular da estrutura simples;

ω_n : enésima frequência angular da estrutura composta;

a_n : constante dada em função da condição de contorno para cada modo de uma viga de seção uniforme e carga distribuída uniformemente.

Ressalta-se que este método é limitado, pois somente é possível estimar as propriedades dos materiais viscoelásticos nas frequências naturais das vigas, reduzindo assim a poucos pontos na faixa de frequência de interesse. Para contornar esta limitação

foram utilizadas várias vigas com comprimentos distintos (vide capítulo 3), de maneira a permitir que fosse obtida uma maior quantidade de informações.

2.3.2 Método de Ensaio de Rigidez com Aplicação Indireta da Força.

Esta segunda técnica proposta de caracterização dos materiais viscoelásticos é um método desenvolvido por P. A. Masterson e R. N. Miles [19], em Binghamton, New York, denominado Método de Ensaio de Rigidez com Medição Indireta da Força.

A montagem utilizada neste método consiste de um bloco metálico fixado a duas cantoneiras de alumínio, através de adesivos viscoelásticos. Essas cantoneiras são fixadas na base de um excitador, conforme ilustrado na figura 2-7. No caso deste trabalho, como será visto no capítulo 3, ao invés de utilizar um bloco metálico, foi utilizado uma caixa de alumínio, com o objetivo de permitir a adição de massas para facilitar as medições e aumentar a precisão dos resultados.

O excitador gera uma vibração de base que conduz a um movimento relativo entre as cantoneiras e o bloco metálico, induzindo assim um esforço cortante nos materiais viscoelásticos existentes entre o bloco e as cantoneiras. A força dinâmica é medida indiretamente através de um acelerômetro fixado na base do excitador e a resposta do bloco também é medida através de um acelerômetro. Nesta montagem pode-se também realizar as medições através de sensores que medem o deslocamento total da base e o relativo entre a base e o bloco.

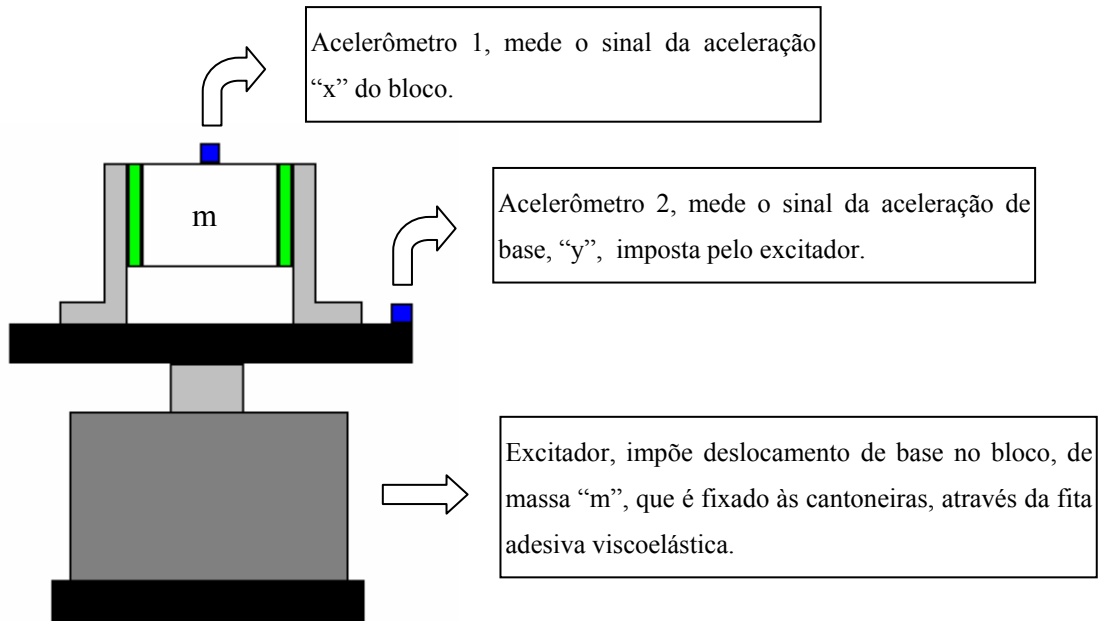


Figura 2-7 – Esquema de montagem do Método de Ensaio de Rigidez com Aplicação Indireta da Força.

Uma das principais vantagens desse método em relação ao Método Padrão da ASTM é a possibilidade de obter uma quantidade bem superior de informações relativa aos materiais viscoelásticos em uma determinada faixa de frequências.

A descrição matemática das equações de G e η pode ser encontrada, detalhadamente, na tese de Mestrado de FAISCA [2] e na referência [19], sendo neste trabalho apresentado apenas o resultado desta dedução.

O experimento mostrado na figura 2-7 permite estimar a Função de Resposta em Frequência (FRF) entre os dois sensores que podem ser em termos de aceleração ou de deslocamento. A partir destes dados é possível obter a rigidez complexa do material viscoelástico através da seguinte equação:

$$K(\omega) = \frac{\omega^2 m}{\left(1 - \frac{1}{H_{xy}(\omega)}\right)} \quad (2.12)$$

Onde,

m = massa do bloco;

ω = frequência angular obtida experimentalmente;

$H_{xy}(\omega)$ = Função de transferência entre o deslocamento do bloco ($x(t)$), e o da base ($y(t)$), obtida experimentalmente (vide [15]).

O material viscoelástico que fixa o bloco à cantoneira possui espessura “h”, largura “b” e comprimento “l”. A relação entre o módulo cisalhante complexo $G(\omega)$ e a rigidez complexa $K(\omega)$ pode ser dada por:

$$G(\omega) = \frac{K(\omega)h}{2bl} \quad (2.13)$$

Onde o fator 2 considera o fato de que há material amortecedor nos dois lados do bloco.

Como a função de transferência é complexa para utilizar as equações (2.12) e (2.13), foi necessário separar as partes real e imaginária, como será mostrado a seguir. Primeiramente, deve-se considerar:

$$H_{xy} = a + bi \quad (2.14)$$

onde,

$a = |H_{xy}| \cos \theta$ - parte real;

$b = |H_{xy}| \text{ sen } \theta$ - parte imaginária;

θ : ângulo de fase entre as parcelas real e imaginária.

Substituindo a equação (2.14) em (2.12) e rearranjando, tem -se :

$$K(\omega) = \frac{\omega^2 m (a + bi)}{(a - 1) + bi} \quad (2.15)$$

Considerando que: $a - 1 = z$, e substituindo-se essa equação em (2.15), tem-se:

$$K(\omega) = \frac{\omega^2 m (a + bi)}{(z + bi)} \quad (2.16)$$

Multiplicando a equação (2.16) pelo conjugado, $z - bi$, tem-se:

$$K(\omega) = \frac{\omega^2 m (ax - abi + xbi + b^2)}{z^2 + b^2} \quad (2.17)$$

Substituindo-se a equação de “z” em (2.17), e rearranjando a equação, tem-se:

$$K(\omega) = \frac{\omega^2 m (a^2 - b^2 - a - bi)}{a^2 - 2a + b^2 + 1} \quad (2.18)$$

Separando-se as partes real e imaginária da equação (2.18), obtém-se:

$$K(\omega)_{REAL} = \frac{\omega^2 m (a^2 - b^2 - a)}{a^2 - 2a + b^2 + 1} \quad (2.19)$$

$$K(\omega)_{IMAGINÁRIO} = \frac{-\omega^2 m b}{a^2 - 2a + b^2 + 1} \quad (2.20)$$

Substituindo-se (2.19) e (2.20) na equação (2.13), obtém-se:

$$G(\omega)_{REAL} = \frac{\omega^2 m (a^2 - b^2 - a) h}{2bl(a^2 - 2a + b^2 + 1)} \quad (2.21)$$

$$G(\omega)_{IMAGINÁRIO} = \frac{-\omega^2 m b h}{2bl(a^2 - 2a + b^2 + 1)} \quad (2.22)$$

onde,

$$G(\omega) = \sqrt{(G(\omega)_{REAL})^2 + (G(\omega)_{IMAGINÁRIO})^2} \quad (2.23)$$

$$\eta(\omega) = \frac{G(\omega)_{IMAGINÁRIO}}{G(\omega)_{REAL}} \quad (2.24)$$

O resultado final dessa separação, conduzindo às equações (2.23) e (2.24), facilita a apresentação gráfica das propriedades dos materiais viscoelásticos em relação a variação da frequência.

2.3.3 Método de Ensaio de Rigidez com Aplicação Direta da Força.

Esta é uma terceira técnica desenvolvida no Laboratório de Análise Dinâmica e Processamento de Sinais, LADEPIS, do Programa de Engenharia Civil da COPPE e possui uma enorme semelhança com o método apresentado na seção anterior (item 2.3.2). Entretanto, consiste em obter a rigidez de uma amostra do material amortecedor, medindo-se diretamente a força dinâmica, através de uma célula de carga e sua resposta através de um acelerômetro ou de um sensor de deslocamento, conforme ilustrado na figura 2-8.

De acordo com o tipo de excitação empregada, pode-se estimar o módulo cisalhante complexo assim como o fator de perda do material viscoelástico em uma larga região de frequências, com isso este método passa a ser tão vantajoso quanto o método anterior, isto é, permite obter um número maior de informações dentro da faixa de interesse. Adicionalmente, este método ainda apresenta como vantagem em relação ao anterior, o maior controle sobre a força utilizada para excitar o bloco.

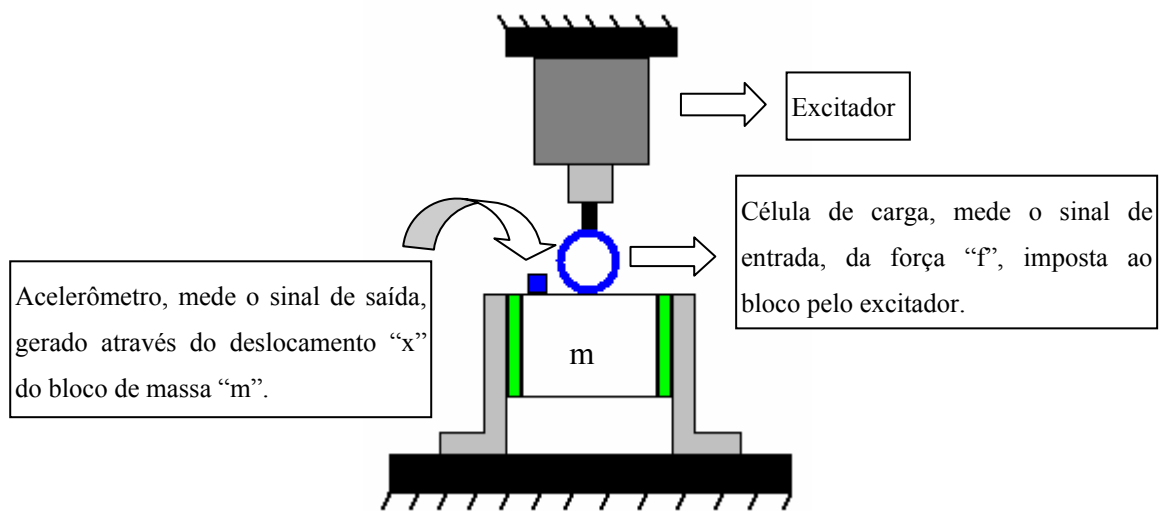


Figura 2-8 – Esquema de Montagem do Método Direto

Os cálculos que se seguem são também semelhantes aos do método anterior, porém com algumas diferenças devido à medição direta da força.

Neste caso, a equação da rigidez complexa de um material amortecedor é dada pela seguinte equação:

$$K(\omega) = \frac{1}{H_{xf}(\omega)} + m\omega^2 \quad (2.25)$$

Onde,

m = massa do bloco;

ω = frequência angular obtida experimentalmente;

$H_{xf}(\omega)$ = função de resposta em frequência entre $x(t)$ e $f(t)$ obtida experimentalmente.

Da mesma forma que no Método Indireto, primeiramente, deve-se considerar:

$$H_{xf} = a + bi \quad (2.26)$$

onde,

$a = |H_{xf}| \cos \theta$ - parte real;

$b = |H_{xf}| \sin \theta$ - parte imaginária;

Substituindo a equação (2.26) em (2.25) e rearranjando, tem-se :

$$K(\omega) = \frac{1 + \omega^2 m (a + bi)}{a + bi} \quad (2.27)$$

Multiplicando a equação (2.27) pelo conjugado, $a - bi$, e lembrando-se que: $i^2 = -1$, tem-se:

$$K(\omega) = \frac{a - bi + \omega^2 m (a^2 + b^2)}{a^2 + b^2} \quad (2.28)$$

Separando-se as partes real e imaginária da equação (2.28), obtém-se:

$$K(\omega)_{REAL} = \frac{a + \omega^2 m (a^2 + b^2)}{a^2 + b^2} \quad (2.29)$$

$$K(\omega)_{IMAGINÁRIO} = \frac{-b}{a^2 + b^2} \quad (2.30)$$

Substituindo-se as equações (2.29) e (2.30) na equação (2.13), obtém-se:

$$G(\omega)_{REAL} = \frac{[a + \omega^2 m (a^2 + b^2)]h}{2bl(a^2 + b^2)} \quad (2.31)$$

$$G(\omega)_{IMAGINÁRIO} = \frac{-bh}{2bl(a^2 + b^2)} \quad (2.32)$$

Por fim, substituindo as equações (2.31) e (2.32) nas equações (2.23) e (2.24), são obtido os valores do módulo cisalhante dinâmico e do fator de perda, respectivamente, para este método.

Através dos rearranjos feitos para estas equações foi possível obter os ajustes das curvas de G e η mais facilmente. No capítulo 3, devido a dificuldade de caracterizar os materiais viscoelásticos para as baixas frequências, será vista a aplicação dos três métodos, utilizando estratégias de ensaios, como por exemplo, a escolha de sensores e montagem do aparato experimental, um pouco diferente dos esquemas apresentados pelas figuras de cada método.

3. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DOS MATERIAIS VISCOELÁSTICOS PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS DE VIBRAÇÃO

Este capítulo tem como principal objetivo desenvolver metodologias para caracterizar os materiais viscoelásticos para a faixa de frequência entre 0 e 10 Hz – onde os *risers* rígidos instalados em águas profundas estão mais sujeitos aos problemas dinâmicos. A caracterização dos materiais é realizada a partir de ensaios que utilizam métodos específicos de caracterização de materiais viscoelásticos. Ressalta-se que a caracterização desses materiais, para baixas frequências de vibração, é necessária para a futura aplicação da concepção de vigas sanduíches em *risers* rígidos, bem como dutos em geral. Muitas estratégias de ensaios foram desenvolvidas e testadas a fim de caracterizar este tipo de material. Estas estratégias conduzem a estimativas de G e η , os quais poderão servir de parâmetros básicos para futuros projetos de estruturas que estejam relacionados com o problema de vibrações.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Análise Dinâmica e Processamento de Imagens e Sinais, LADEPIS, do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.

Uma série de equipamentos e sensores foram utilizados para a aquisição dos dados durante os ensaios experimentais, de forma que se garantisse a captação de todas as informações necessárias para a análise dos resultados. No apêndice 1 são apresentadas as principais características dos sensores e equipamentos utilizados em cada ensaio.

A seguir, são apresentados para cada uma das técnicas do capítulo 2, a metodologia utilizada nos ensaios, os resultados obtidos e a análise desses resultados. Além disso, também são apresentados os resultados de um teste de fluência do material viscoelástico, bem como uma comparação dos resultados entre os métodos testados.

3.1 Ensaios Utilizando o Método Padrão da ASTM

O principal objetivo dos ensaios utilizando o Método Padrão da ASTM, é estimar as frequências naturais e taxas de amortecimento das barras simples e de um

sistema estrutural composto por três camadas: a camada da estrutura (barra simples), a camada de material viscoelástico e a camada de restrição (outra barra simples). Este tipo de sistema é conhecido na literatura técnica como viga sanduíche e foi descrito sucintamente no capítulo 2.

A estimativa desses dados permite caracterizar o material viscoelástico através da obtenção do módulo cisalhante, G , e do fator de perda, η , de acordo com as equações 2.7 e 2.8, apresentadas no capítulo 2.

Como a obtenção dos parâmetros G e η está sempre associada a frequência natural da estrutura simples e da estrutura composta (viga sanduíche), é muito importante estar atento aos cuidados necessários que devem ser tomados em todas as etapas do ensaio para evitar imprecisões de uma forma geral e alterações nas propriedades dinâmicas da estrutura.

No item 3.1.1 são apresentadas algumas precauções necessárias que devem ser tomadas para a utilização deste método.

3.1.1 Precauções na Utilização do Método Padrão da ASTM

Antes de apresentar a descrição e os resultados dos ensaios utilizando o método padrão da ASTM, é importante ressaltar as precauções que devem ser tomadas referentes ao próprio ensaio e principalmente ao material viscoelástico. Com isso, baseando-se em [2] e [18], as principais precauções a serem tomadas são:

- ⇒ É importante selecionar uma espessura apropriada do material amortecedor de maneira que seja possível se obter quantidades mensuráveis de amortecimento. Para os ensaios de barra sanduíche pode-se começar com uma razão de espessura de 1:10 entre o material amortecedor e o da barra simples [18];
- ⇒ Muito importante e que deve ser dado ênfase é a base, vide figura 3-1, utilizada nas barras dos ensaios com vigas sanduíches, esta é necessária a fim de definir com precisão a posição real do engaste, devendo esta estar fixada em local bem rígido;

- ⇒ Importante também é que os impactos sejam dados de forma cuidadosa, a fim de que não se excitem modos associados a torção, já que estes não são levados em conta nas análises;
- ⇒ Deve-se seguir todas as recomendações dos fabricantes na aplicação do adesivo viscoelástico que, neste caso, são a limpeza das barras (tanto a estrutura quanto a camada de restrição) em que será fixado o adesivo viscoelástico, com álcool isopropílico, para que sejam eliminadas impurezas que possam influenciar na boa aderência do material às barras. Após a colagem, deve ser realizada uma leve pressão, podendo utilizar uma espátula ou um rolete, para que os esforços sejam distribuídos igualmente, ajudando na fixação e evitando que se criem bolhas de ar entre as barras e o adesivo. No que diz respeito ao tempo de cura, estes materiais possuem 100% de aderência após 72 horas de colagem [20];
- ⇒ Deve-se confeccionar uma placa de metal de mesma espessura que o material viscoelástico de forma que se encaixe no espaço formado na região da base de engaste da viga sanduíche para que não ocorra o descolamento do material viscoelástico quando a viga sanduíche for engastada. Esse problema será ressaltado no item 3.1.3;
- ⇒ O engaste das estruturas deverá ser garantido. Para isto deve-se dar um aperto suficiente nas porcas nos parafusos fixados na placa de engastamento (vide foto 3-1 e figura 3-2).

3.1.2 Obtenção dos Parâmetros Modais Utilizando as Vigas Simples

Com base no Método Padrão da ASTM descrito em [18] e na tese de Mestrado de FAISCA (1998) [2] as vigas utilizadas nos ensaios são do tipo engastada numa extremidade e livre na outra. A extremidade engastada apresenta uma espessura maior que o restante da viga, e tem a função de garantir o engastamento dessa viga, conforme mostrado na figura 3-1. O material utilizado para a confecção das vigas foi o alumínio, pois é um material cujas vigas apresentam um bom controle de qualidade das suas dimensões e pode ser trabalhado facilmente através de uma máquina fresadora de forma a garantir as dimensões desejadas.

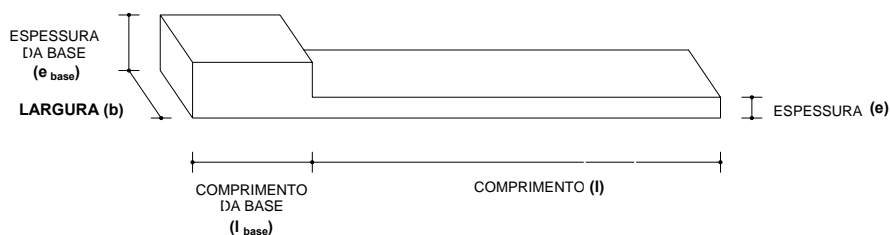


Figura 3-1 – Viga de alumínio confeccionada utilizada como engastada – livre.

As vigas de alumínio foram confeccionadas no Laboratório de Metalurgia da COPPE/UFRJ. Foram confeccionadas duas vigas dos tipos A e B e quatro dos tipos C e D. A tabela 3-1 mostra as características físicas e geométricas das vigas, e as frequências naturais calculadas teoricamente [21].

Tabela 3-1 - Características das vigas simples utilizadas nos ensaios.

Tipo	Quantidade (n)	E_{Al} (N/mm ²)	ρ_{Al} (Kg/mm ³)	ω_n (Hz)		l (mm)	b (mm)	e (mm)	l _{base} (mm)	e _{base} (mm)
				ω_1	ω_2					
A	2	68700	2.71E-06	0.54	3.37	2756	50	5	100	19.05
B	2			1.02	6.38	2002				
C	4			5.03	31.51	900				
D	4			8.31	52.08	704				

Deve-se ressaltar que a diferença de comprimento para cada tipo de barra caracteriza o material viscoelástico para um maior número de frequências, já que por esse método as propriedades do material viscoelástico são obtidas apenas nas frequências naturais de cada barra ensaiada.

Para obter as características dinâmicas experimentalmente, foram realizados ensaios de vibração livre com todas as vigas simples e em seguida, os seus parâmetros modais foram obtidos utilizando a técnica do decremento logarítmico [14] e [15].

A resposta da estrutura (deslocamento) à um deslocamento prescrito foi medida através de um sensor sem contato do tipo indutivo. Isso se fez necessário já que os modelos utilizados são muito esbeltos e qualquer massa adicional, como por exemplo a de um acelerômetro, alteraria a massa das barras podendo influenciar nos resultados finais do ensaio. Uma outra vantagem desse sensor é que não impõe nenhuma forma de

amortecimento a estrutura que poderiam influenciar ou até mesmo impossibilitar os ensaios, tais como os cabos dos acelerômetros.

A figura 3-2 ilustra o esquema de montagem, instrumentação e aquisição de sinais utilizado. Os sinais no tempo do sensor sem contato, logo após serem condicionados e filtrados, são aquisitados através de uma placa de aquisição instalada em um micro computador.

A foto 3-1 mostra um detalhe do engaste da viga e do sensor de deslocamento sem contato instalado próximo ao engaste.

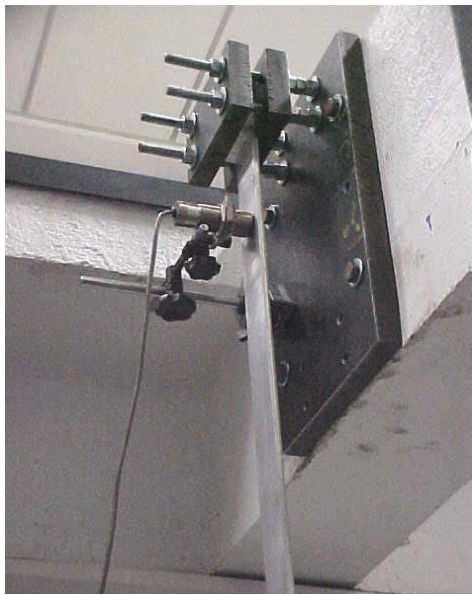


Foto 3-1 – Detalhe do engaste e do sensor sem contato.

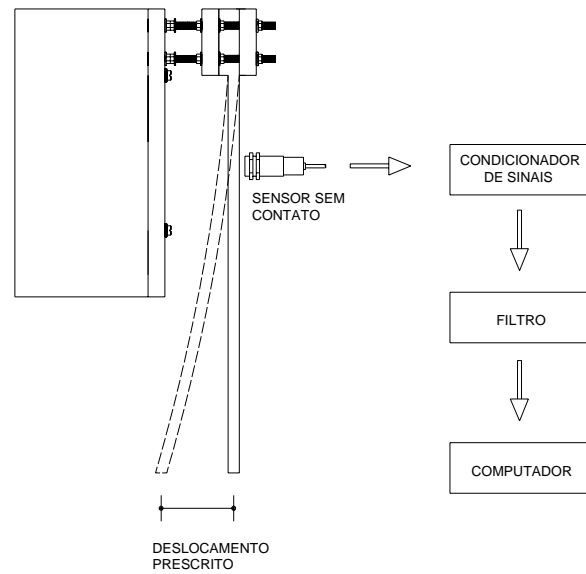


Figura 3-2 – Esquema de montagem, instrumentação e aquisição de sinais utilizado para o ensaio com as vigas simples.

A figura 3-3 mostra uma resposta típica de uma viga simples engastada e livre sujeita ao ensaio de vibração livre e a tabela 3-2 mostra os resultados dessas vigas obtidos através da técnica do decremento logarítmico. Nesta tabela os tipos de vigas (A, B, C ou D) são referenciados na 1ª coluna, e os valores médios e os desvios padrão foram obtidos a partir de 6 amostras.

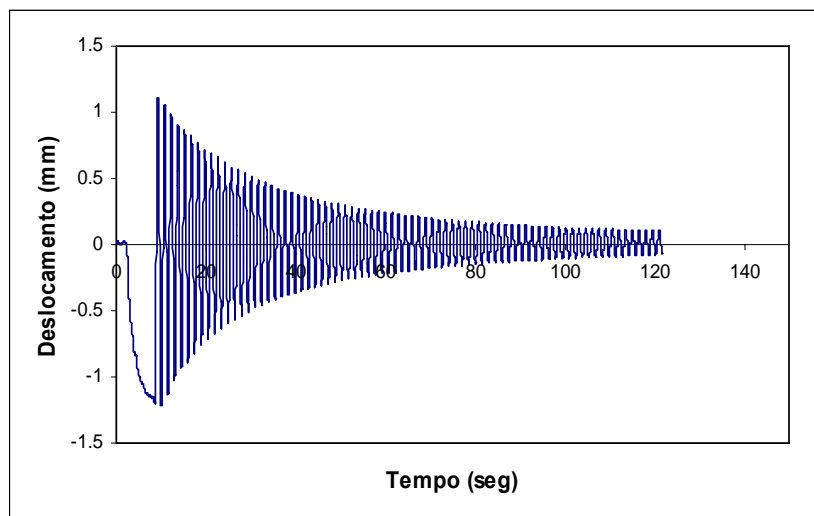


Figura 3-3 – Ensaio de vibração livre típico com a viga simples 2 tipo A (V₂ - a).

Tabela 3-2 - Parâmetros modais das vigas simples obtidos nos ensaios de vibrações livres.

Estrutura	ω_1 (Hz)		ξ_1 (%)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
V₁ – a	0.67	0.05	0.16	0.00
V₂ – a	0.65	0.01	0.16	0.01
V₃ – b	1.12	0.01	0.18	0.05
V₄ – b	1.08	0.01	0.17	0.01
V₅ – c	5.23	0.01	0.22	0.02
V₆ – c	5.26	0.00	0.23	0.01
V₇ – c	5.16	0.01	0.23	0.01
V₈ – c	5.15	0.02	0.22	0.01
V₉ – d	8.66	0.01	0.15	0.00
V₁₀ – d	8.58	0.02	0.15	0.00
V₁₁ – d	8.52	0.01	0.15	0.01
V₁₂ – d	8.76	0.01	0.14	0.01

Comparando-se as frequências naturais obtidas com as esperadas teoricamente, para cada uma das vigas, indicadas na tabela 3-1, pode-se observar uma maior variação na viga de maior comprimento (tipo A), e que esta variação vai diminuindo a medida que o comprimento das vigas diminuem. Isto pode ser explicado pelo fato das vigas do tipo A serem muito esbeltas, podendo não funcionar mais como vigas e/ou ter um comportamento não-linear. Para as demais vigas nota-se uma boa correlação dos resultados, indicando que existe uma boa confiabilidade nesses resultados tanto para as montagens quanto para as técnicas experimentais utilizadas.

A técnica do decremento logarítmico permite estimar os parâmetros modais apenas para o primeiro modo de vibração da estrutura. Em função dessa limitação, para a obtenção de outros modos de vibração é necessário adotar outras formas de excitar a estrutura e outras técnicas de estimativa dos parâmetros modais como por exemplo, para este trabalho, foi utilizada a implementação da técnica STFT (Short Time Fourier Transform), desenvolvida por [16].

⇒ **Obtenção dos Parâmetros Modais do Segundo Modo de Vibração Utilizando as Barras Simples**

A figura 3-4 mostra a estratégia adotada para que fosse possível excitar o segundo modo de vibração.

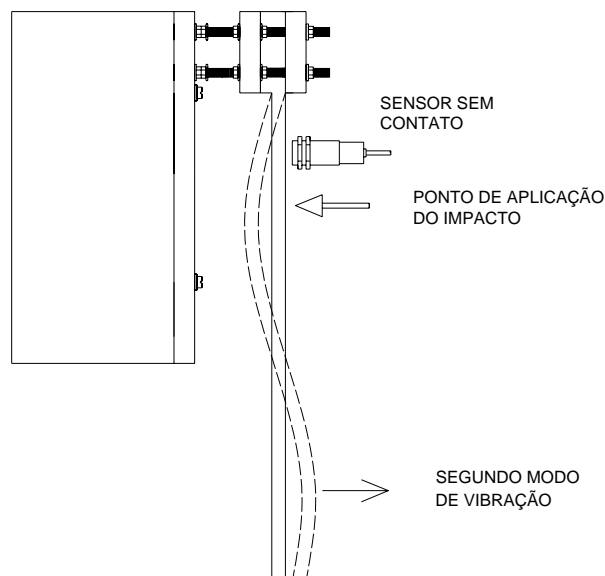


Figura 3-4 – Estratégia utilizada para excitação do segundo modo de vibração.

Como pode ser observado na figura 3-4, foi preciso aplicar impactos em uma região próxima ao ventre para que o segundo modo de vibração fosse excitado, porém os impactos foram dados de forma cuidadosa, a fim de que não fossem excitados os modos associados a torção, conforme foi abordado no ítem 3.1.1.

A técnica STFT permite estimar, através dos dados adquiridos no ensaio, os parâmetros modais dos modos excitados. As figuras 3-5 mostra um resultado típico das respostas do sensor de deslocamento no domínio do tempo, enquanto a figura 3-6 ilustra uma tela típica do sistema utilizado contendo o espectro da resposta e a crista da transformada tempo-frequência em uma das frequências naturais, maiores detalhes sobre o sistema pode ser visto nas teses de Doutorado de BUCHER (2001) [16] e Mestrado de PITELA (2006) [3].

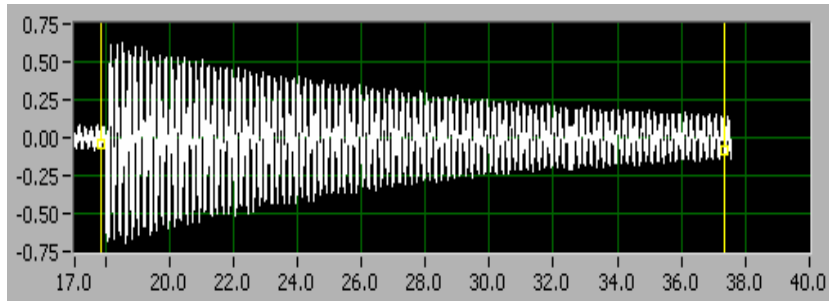


Figura 3-5 – Resultado obtido no domínio do tempo para a viga $V_5 - c$.

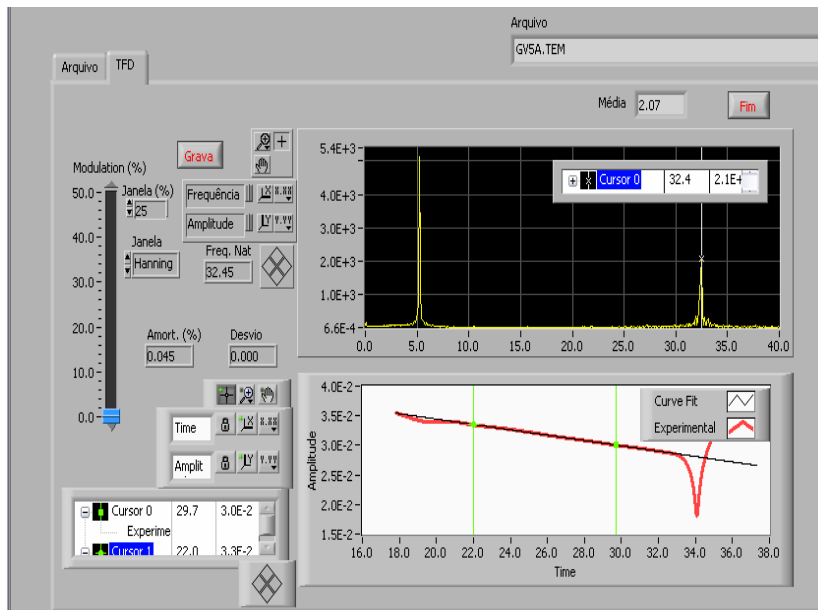


Figura 3-6 – Tela típica do sistema utilizado [16] contendo os resultados da viga $V_5 - c$.

Pode-se observar na figura 3-6 (parte inferior) o trecho da crista utilizado para estimar a taxa de amortecimento associado ao segundo modo do ensaio com a viga $V_5 - c$.

A tabela 3-3 mostra os resultados das barras simples obtidos para o segundo modo de vibração, estimados através da técnica do STFT. É importante ressaltar que os resultados estimados para o primeiro modo, utilizando esta técnica, são muito semelhante aos obtidos utilizando-se a técnica do decremento, apresentados na tabela 3-2, e por esta razão não são aqui mostrados.

Nesta tabela os valores médios e os desvios padrões foram obtidos a partir de 4 amostras.

Tabela 3-3 - Parâmetros modais do segundo modo de vibração estimados através da técnica STFT.

Estrutura viga simples	ω_2 (Hz)		ξ_2 (%)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
V₁ – a	3,58	0,20	0,16	0,01
V₂ – a	3,46	0,01	0,15	0,00
V₃ – b	6,47	0,00	0,15	0,00
V₄ – b	6,33	0,01	0,06	0,00
V₅ – c	32,40	0,01	0,04	0,00
V₆ – c	32,59	0,02	0,04	0,00
V₇ – c	31,54	0,00	0,05	0,00
V₈ – c	32,03	0,02	0,04	0,00
V₉ – d	54,08	0,04	0,03	0,00
V₁₀ – d	53,69	0,02	0,03	0,00
V₁₁ – d	53,44	0,02	0,03	0,00
V₁₂ – d	54,74	0,02	0,03	0,00

3.1.3 Confeção das Vigas Sanduíches

Antes de abordar o processo de confecção das vigas sanduíches foi realizado um teste para avaliar os ciclos de histerese do material viscoelástico.

O objetivo principal deste ensaio foi observar os ciclos de histereses do material VHB afim de verificar se estes ciclos possuem uma forma elíptica para que ele seja considerado um material com propriedades viscoelásticas, conforme foi abordado no capítulo 2.

A montagem deste ensaio foi a mesma utilizada no ensaio do Método Direto, utilizando uma força de excitação harmônica. A figura 3-7 mostra um resultado típico obtido do material VHB onde apresenta o gráfico da força de excitação versus a resposta medida. Através deste resultado nota-se claramente que o material VHB possui características viscoelástica.

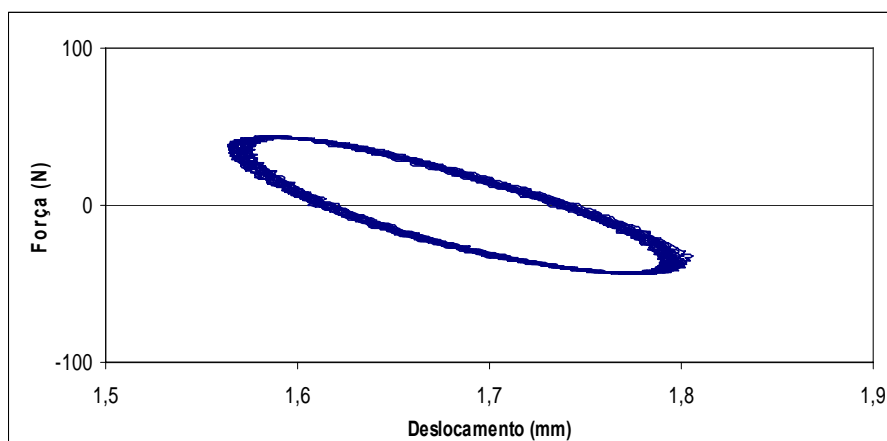


Figura 3-7 – Resultado típico do ciclo de histerese do material viscoelástico.

A confecção das vigas sanduíche foi feita através da aplicação de uma camada de material viscoelástico do tipo VHB 4955 [20] em cada par de viga simples do mesmo tipo, vide tabela 3-1, transformando as vigas simples em uma estrutura composta denominada de viga sanduíche. A tabela 3-4 mostra o tipo e a quantidade de vigas sanduíche, assim como as características geométricas do material VHB utilizado.

Tabela 3-4 – Características das vigas sanduíche e do material amortecedor utilizado.

Viga Sanduíche (VS)		VHB 4955			
Tipo	Quantidade (n)	ρ_{Al} (Kg/mm ³)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
VS ₁ - a	1	7,95E-07	2	19	2756
VS ₂ - b	1				2002
VS ₃ - c	2				900
VS ₄ - c					704
VS ₅ - d	2				
VS ₆ - d					

As fotos 3-2, 3-3 e 3-4 mostram o processo de confecção, desde a aplicação do material viscoelástico até a etapa final da montagem de uma das vigas sanduíche que foi utilizada nos ensaios.



Foto 3-2 – Primeira etapa - Aplicação da camada de material viscoelástico.

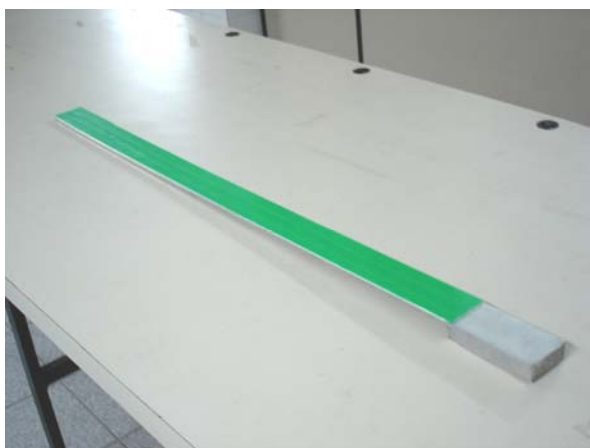


Foto 3-3 – Segunda etapa - VHB 4955 aderido na barra para a fixação do outro par de barra.



Foto 3-4 – Etapa final - viga sanduíche confeccionada.

Como pode ser observado na foto 3-4, o material viscoelástico não é fixado na região da base da viga sanduíche - região de engastamento - portanto essa região apresenta um espaçamento entre as duas barras. Quando a estrutura é engastada, as bases das barras unem-se forçando um descolamento do material viscoelástico num trecho da estrutura, conforme é mostrado na figura 3-8. Esse descolamento conduz a uma perda da capacidade de cisalhamento da viga sanduíche, reduzindo a taxa de amortecimento.

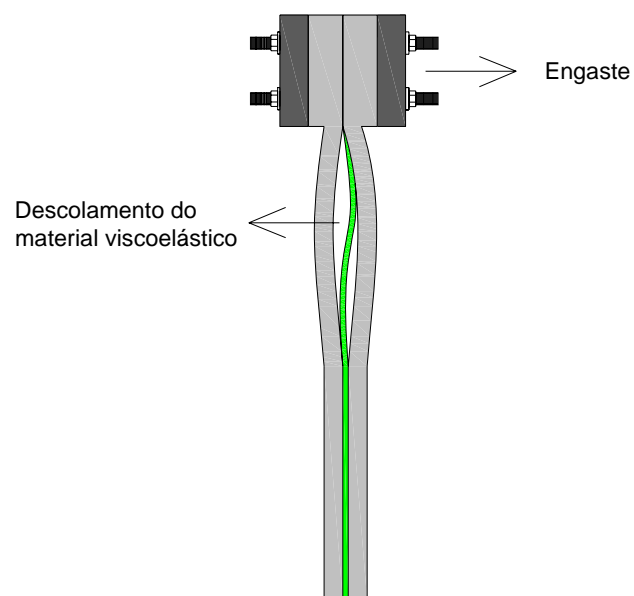


Figura 3-8 – Descolamento do material viscoelástico das barras.

Para evitar que esse problema ocorresse foi confeccionada uma placa da mesma espessura do material amortecedor e da mesma largura da estrutura. Através da figura 3-9 e da foto 3-5 é possível visualizar a instalação da placa, a qual evita o descolamento do material viscoelástico na viga sanduíche.

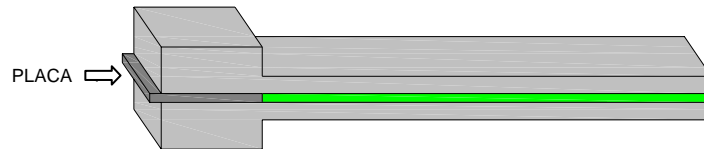


Figura 3-9 – Placa para evitar o descolamento do material viscoelástico nas vigas sanduíches.

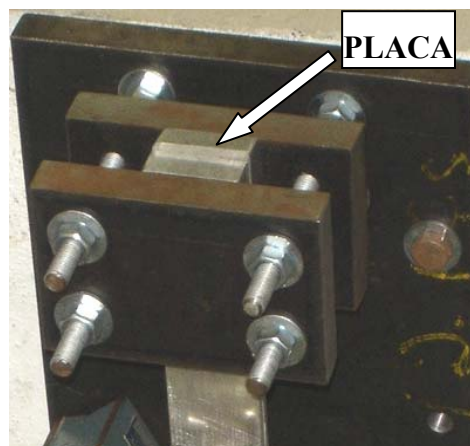


Foto 3-5 – Viga sanduíche engastada utilizando a placa para evitar o descolamento do amortecedor.

3.1.4 Obtenção dos Parâmetros Modais das Vigas Sanduíches

Tanto a instrumentação utilizada, como a estratégia adotada para a obtenção das propriedades dinâmicas foram realizadas da mesma forma das vigas simples como descrito no item 3.1.2.

As figuras 3-9 e 3-10 mostram, respectivamente, respostas típicas obtidas no domínio do tempo e da frequência para uma viga sanduíche.

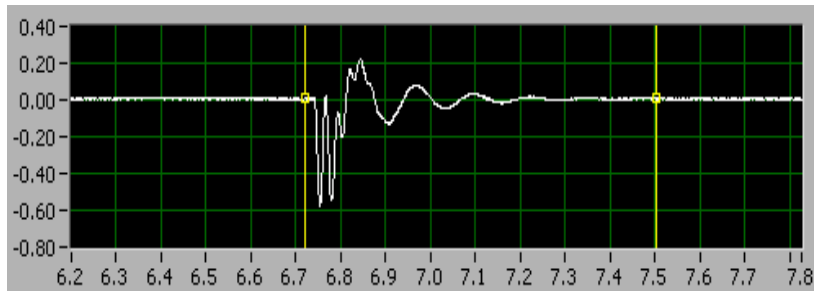


Figura 3-10 – Resultado obtido no domínio do tempo para a barra do tipo VS₄ – c.

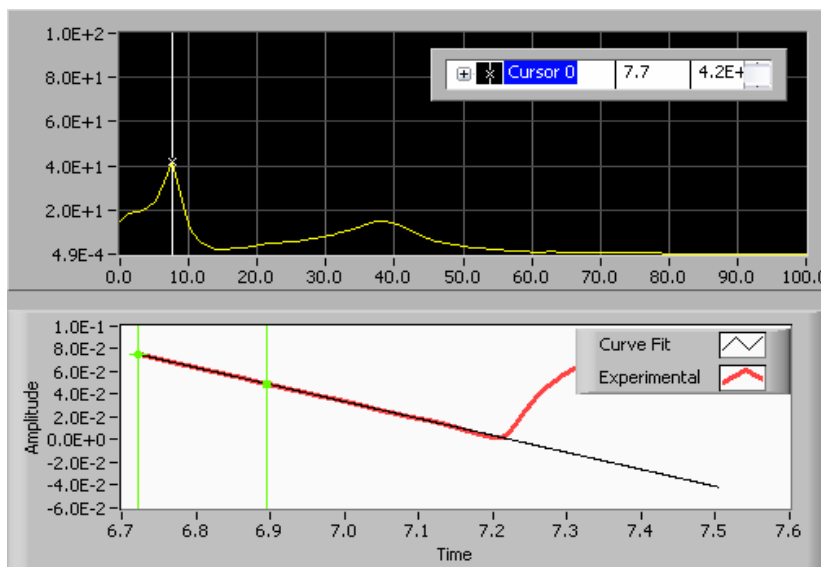


Figura 3-11 - Resultado obtido no domínio da frequência para a barra do tipo VS₄ – c.

Pode-se observar no figura 3-11 o bom ajuste obtido para a taxa de amortecimento associado a frequência natural de 7.7 Hz.

A tabela 3-5 mostra os valores das frequências naturais e taxas de amortecimento para os dois primeiros modos de vibração das vigas sanduíches obtidas pela técnica STFT.

Tabela 3-5 – Frequências Naturais e taxas de amortecimento obtidas dos ensaios com as vigas sanduíches.

Estrutura viga sanduíche	ω_1 (Hz)		ξ_1 (%)		ω_2 (Hz)		ξ_2 (%)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
VS ₁ – a	1,17	0,04	8,21	0,07	5,15	0,08	15,22	0,25
VS ₂ – b	2,07	0,05	8,69	0,11	10,08	0,17	16,80	0,15
VS ₃ – c	8,25	0,04	14,22	0,07	38,50	0,35	12,40	0,07
VS ₄ – c	8,02	0,33	14,30	0,10	38,26	0,73	11,63	0,30
VS ₅ – d	12,47	0,11	16,70	0,07	61,65	0,47	10,57	0,15
VS ₆ – d	12,66	0,32	16,34	0,37	62,84	0,43	11,33	0,25

3.1.5 Resultados Obtidos do Módulo Cisalhante e Fator de Perda Aplicando o Método Padrão da ASTM

A partir dos parâmetros modais obtidos para as vigas simples (tabela 3-2), para as vigas sanduíches (tabela 3-5) e das equações 2.6 e 2.7 é possível caracterizar o material VHB 4955, obtendo-se os valores de G e η na frequência natural das vigas simples. A tabela 3-6 indica os valores médios e os desvios padrões de G e η obtidos.

Tabela 3-6– Valor médio e desvio padrão de G e η para o material viscoelástico na faixa de frequência, entre 0 e 10 Hz, das vigas simples.

Tipo de barra	ω_1 (Hz)		G_{2n} (Pa)		η_{2n}	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
A	0,66	0,00	7,93E+04	6,61E+03	0,41	0,01
B	1,10	0,00	2,82E+05	2,87E+04	0,51	0,03
C	5,22	0,01	5,93E+05	7,68E+03	0,72	0,00
	5,16	0,02	5,35E+05	3,51E+03	0,75	0,00
D	8,61	0,04	7,47E+05	1,36E+04	0,79	0,00
	8,62	0,05	7,54E+05	5,25E+04	0,80	0,00
Tipo de barra	ω_2 (Hz)		G_{2n} (Pa)		η_{2n}	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
A	3,53	0,00	4,14E+05	5,9E+03	0,77	0,01
B	6,40	0,00	5,89E+05	2,1E+04	0,84	0,03

Através dos valores obtidos para G e η , indicados na tabela 3-6 são confeccionadas as figuras 3-12 e 3-13 que apresentam, respectivamente, a variação do módulo cisalhante e do fator de perda em função da frequência. Ressalta-se que para as barras do tipo C e D os valores referentes ao 2º modo de vibração não foram apresentados na tabela 3-7 e nas figuras 3-12 e 3-13, pois eles excedem a faixa de frequência de interesse.

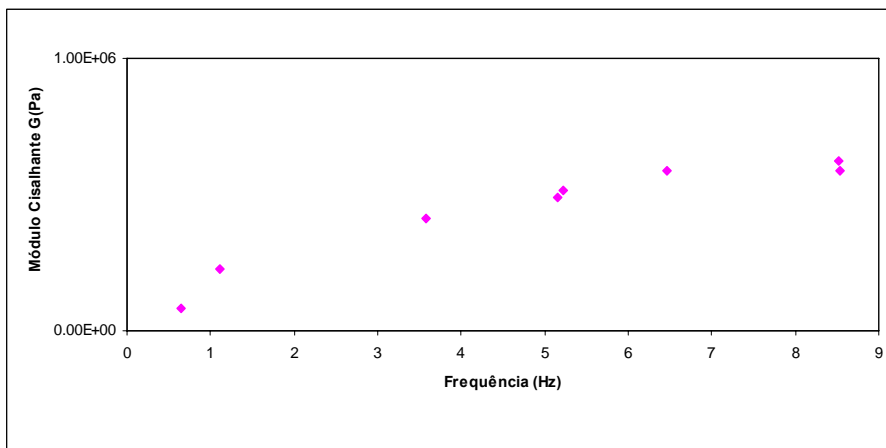


Figura 3-12 – Módulo cisalhante G do material VHB.

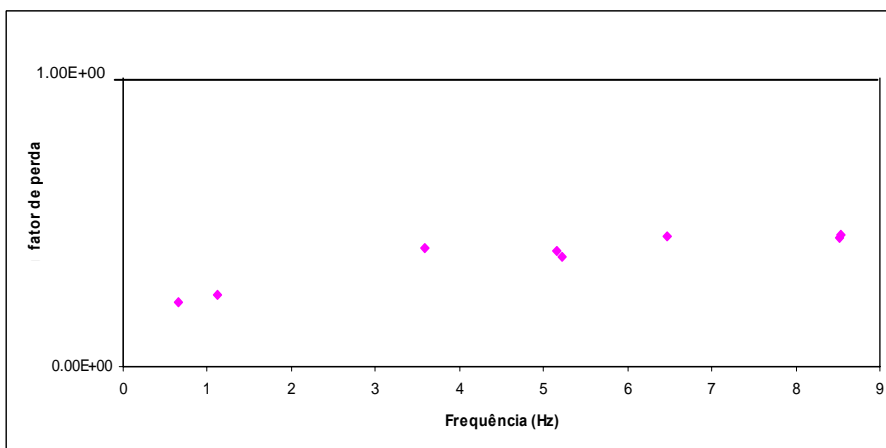


Figura 3-13 – Fator de perda η para o material VHB.

Os resultados obtidos para G e η parecem ser coerentes, porém deve-se abrir uma exceção para os dois primeiros pontos das figuras 3-12 e 3-13, relacionados às

frequências 0,66 e 1,10 Hz. Conforme mencionado anteriormente, as barras de maior comprimento (tipos A e B) são muito esbeltas, podendo apresentar alguma não-linearidade ou mesmo não podendo mais serem modelados como vigas.

Além disso, essas barras apresentaram uma espessura não uniforme ao longo do seu comprimento, conduzindo, naturalmente, à imprecisões nos resultados apresentados para esses dois pontos.

3.2 Método de Ensaio de Rigidez com Aplicação Indireta da Força

O principal objetivo desse método é caracterizar o material viscoelástico obtendo uma série de pontos para G e η dentro da faixa de frequência. Neste trabalho, esta caracterização será realizada para a faixa de baixas frequências, entre 0 e 10 Hz. Cabe ressaltar que a obtenção de G e η , para toda a faixa de frequência de análise, é uma vantagem em relação ao Método da ASTM, já que este método estima esses parâmetros apenas nas frequências naturais das barras.

Conforme descrito no capítulo 2, neste método é necessária a obtenção da função de transferência, $H_{xy}(\omega)$, entre a resposta, $y(t)$, e a excitação, $x(t)$. Para as medições da resposta e da excitação foram utilizados dois acelerômetros resistivos de capacidade de 1g ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$).

3.2.1 Descrição do Aparato Experimental e da Instrumentação

Para que se tenha uma visão mais ampla da metodologia empregada, a figura 3-14 ilustra o esquema da montagem do aparato experimental e a foto 3-6 ilustra a posição dos acelerômetros utilizados no ensaio.

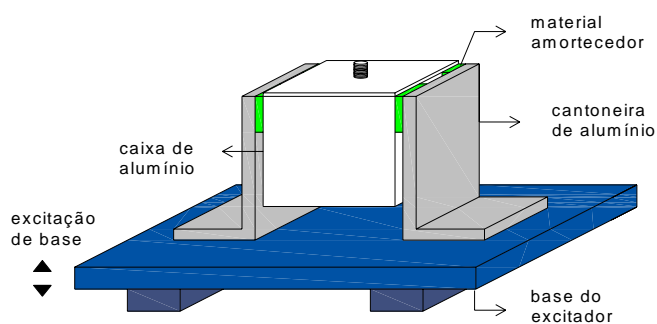


Figura 3-14 – Montagem do aparato experimental para ensaio utilizando o Método Indireto.



Foto 3-6 –Visão geral do ensaio.

Pode-se observar na figura 3-14 e foto 3-6 que a montagem é composta por duas cantoneiras de alumínio rígidas ligadas a uma caixa de alumínio, também rígida, através do material amortecedor. Esta montagem permite variar a massa da caixa de alumínio, que é um parâmetro importante para a obtenção da rigidez complexa através da instalação de chapas metálicas no seu interior, e a área de contato do material amortecedor. A excitação é imposta por um excitador de grande curso (9,15 cm pico a pico), cujas principais características estão apresentadas no apêndice 1.

Com o objetivo de estimar as dimensões e a massa do aparato experimental a ser utilizado nos ensaios deste método, e também no Método direto, foram realizadas simulações numéricas para a obtenção das FRF's – funções de resposta em frequência – com alguns sinais harmônicos que conduziram a estimativa das respostas esperadas. Para isto foram utilizados os valores de G e η obtidos pelo Método ASTM. A partir dessas simulações, teve-se uma base das dimensões que foram utilizadas para a confecção do aparato experimental.

As dimensões externas da caixa de alumínio são: 100 mm x 100 mm x 75 mm e sua massa é de 743,41 g, considerando parafusos, porcas e uma tampa do mesmo material da caixa com as seguintes dimensões: 100 mm x 100 mm x 4,5 mm. A figura 3-15 ilustra detalhadamente a caixa projetada para o ensaio, enquanto a foto 3-7 mostra uma vista da caixa aberta com massa adicional fixada no seu eixo.

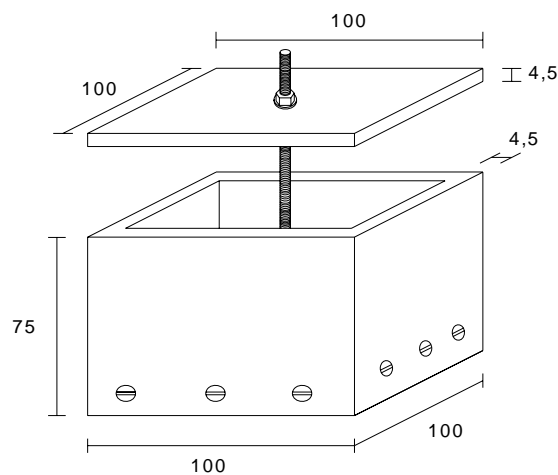


Figura 3-15 – Caixa de alumínio utilizada no ensaio do Método Indireto.

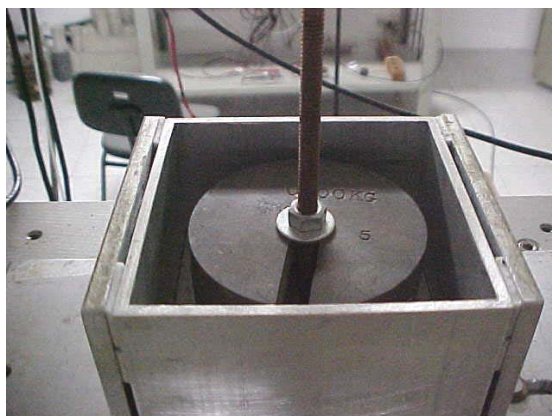


Foto 3-7 – Detalhe da massa adicionada no interior da caixa de alumínio.

A caixa da figura 3-15 e da foto 3-7 foi projetada visando otimizar a obtenção do módulo cisalhante G e do fator de perda η , diminuindo a magnitude da rigidez $K(\omega)$ na equação 2.12, através do rearranjo de trechos de material viscoelásticos. Outra estratégia utilizada, a fim de melhorar as medições da função de transferência, foi o aumento de massas no interior da caixa.

A barra rosqueada permite encaixar e centralizar as massas. A tampa de alumínio serve de base para instalação de sensores que irão captar os sinais de resposta da caixa, como mostra a foto 3-6. As cantoneiras permitem a fixação do material VHB, tanto na caixa como nas próprias cantoneiras, conduzindo o material VHB ao cisalhamento.

Para a obtenção das funções de transferência, foram realizados ensaios utilizando excitação harmônica e aleatória do tipo ruído branco. Os sinais de entrada e o de saída foram medidos através de acelerômetros resistivos, conforme ilustrado na foto 3-6.

A figura 3-16 indica, esquematicamente, a ligação dos equipamentos utilizados neste teste. Através desta figura, nota-se que os sinais no tempo dos sensores, depois de condicionados e filtrados, são transformados para o domínio da frequência através de um analisador de espectros que estima a função de transferência.

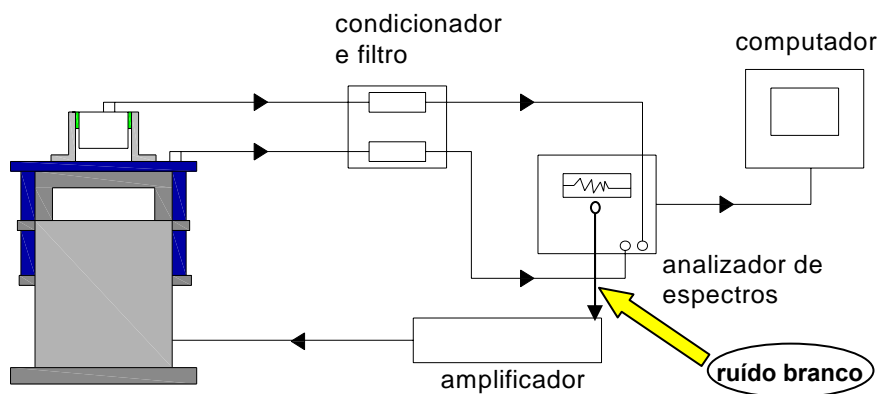


Figura 3-16 – Esquema de montagem utilizado no ensaio do Método Indireto.

3.2.2 Resultados Obtidos do Módulo Cisalhante e Fator de Perda Aplicando o Método Indireto

Foram realizados três ensaios nas mesmas condições, as quais apresentaram FRF's idênticas. Com os dados da parte real e imaginária da FRF é possível calcular a rigidez complexa através da equação 2.12. E com os resultados pode-se estimar as propriedades do material viscoelástico através das equações 2.21, 2.22, 2.23 e 2.24. É importante ressaltar que a parte real do módulo complexo é o próprio G e o fator de perda, η , é a razão entre as partes imaginária e real de G . As figura 3-17 e 3-18 ilustram, respectivamente, o módulo cisalhante, G , e o fator de perda, η , do material amortecedor VHB.

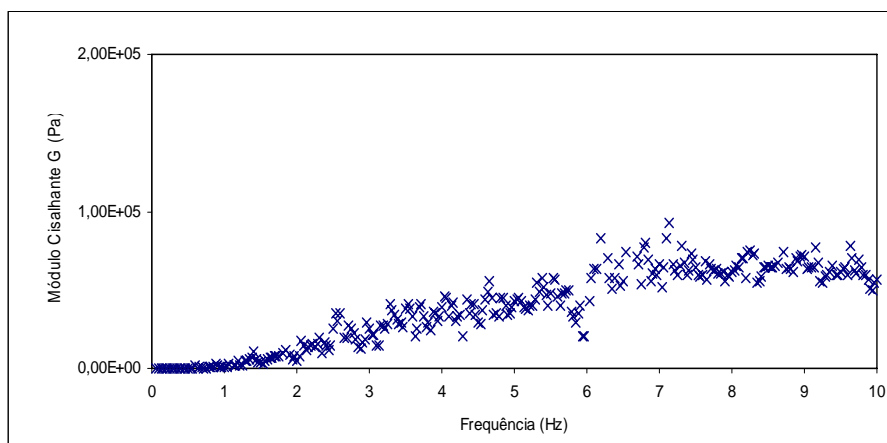


Figura 3-17 – Módulo cisalhante G do material VHB.

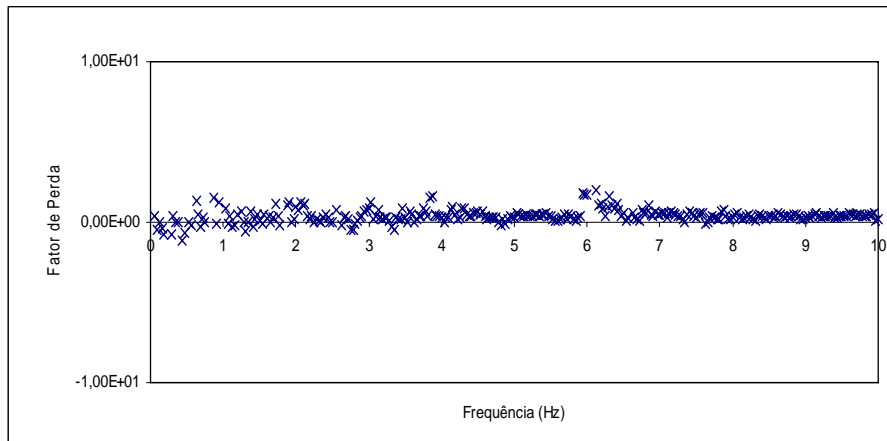


Figura 3-18 – Fator de perda η para o material VHB.

Através dos sinais no domínio do tempo observados durante os testes e das figuras 3-17 e 3-18, conclui-se que a relação sinal/ruído do acelerômetro que está fixado na caixa é muito baixa, conduzindo a uma má qualidade nos resultados de G e η . Isto ocorreu devido ao fato de o excitador não ter capacidade de gerar energia suficiente para mobilizar a caixa em baixas frequências. Este fato conduziu uma dificuldade para a realização das medições, já que, quanto maior a sensibilidade do acelerômetro, menor é a sua faixa de frequência e maior o seu tamanho e peso. Portanto, a instalação de sensores que tivessem a sensibilidade para medir os níveis de aceleração que estavam ocorrendo seria impraticável devido a seu tamanho.

Na tentativa de obter resultados mais coerentes para G e η , foi adicionado massa à caixa (vide foto 3-7) buscando aumentar a força de excitação o que poderia conduzir a um aumento nos níveis de aceleração.

Foram testados algumas variações da quantidade de massa, as quais estão apresentadas nas figuras 3-19 e 3-20. Estas figuras ilustram, respectivamente, o módulo cisalhante, G , e o fator de perda, η , do material amortecedor VHB na situação em que a massa total da caixa é de 4250 g.

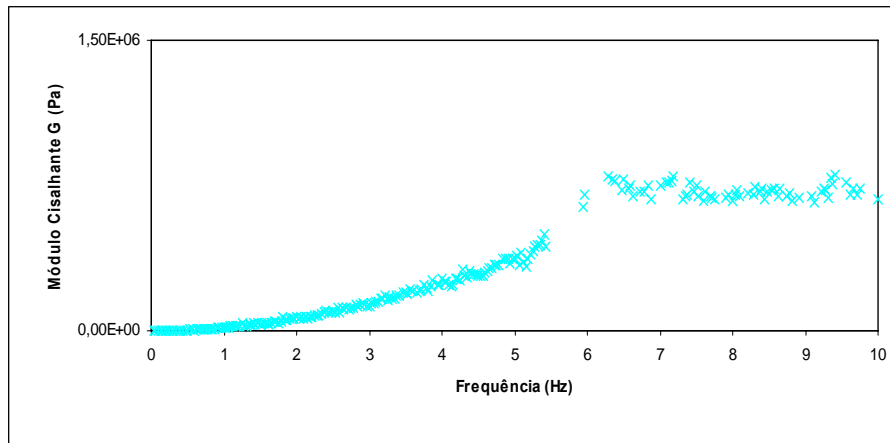


Figura 3-19 – Módulo cisalhante G do material VHB - massa total de 4250 g.

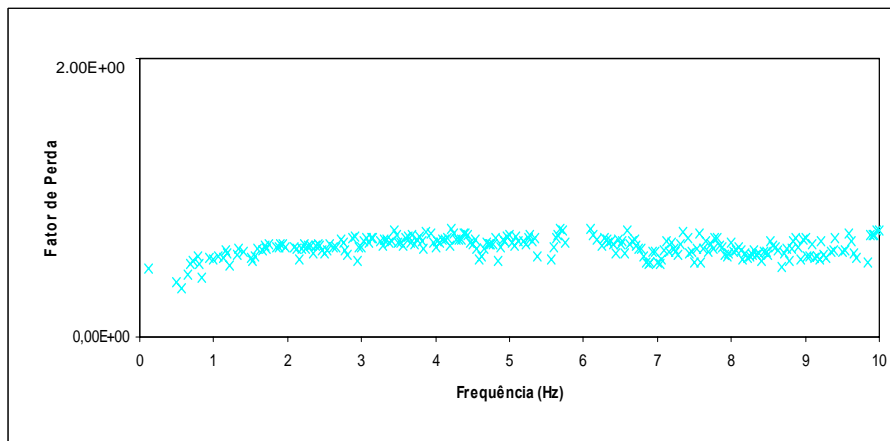


Figura 3-20 – Fator de perda η do material VHB - massa total de 4250 g.

Ressalta-se que a análise das acelerações medidas nestes testes (com aumento de massa) demonstrou um aumento da relação sinal/ruído, porém este aumento foi insuficiente para garantir a qualidade dos resultados obtidos.

3.3 Métodos de Ensaio de Rigidez com Aplicação Direta da Força

As características desse ensaio são parecidas com as do ensaio descrito no item 3.2. O aparato experimental utilizado nos ensaios é o mesmo utilizado no Método

Indireto, entretanto a estratégia desenvolvida para impor cisalhamento no material viscoelástico, é diferente entre os dois métodos.

Uma das diferenças entre os Métodos Direto e Indireto na obtenção está na forma da medição da excitação. Enquanto no Método Indireto a excitação é medida através de um acelerômetro, no Método Direto a excitação é medida através de uma célula de carga instalada entre a massa e um ponto fixo de referência. A outra diferença é que no Método Direto a energia empоста ao material viscoelástico pode ser maior, e principalmente, mais controlada.

Da mesma forma que no Método Indireto os sinais de entrada e saída são utilizados para o cálculo da função de resposta em frequência, $H_{fx}(\omega)$, resultando na obtenção de $K(\omega)$ e das curvas G e η , sendo agora o sinal de entrada é a força, $f(t)$, e o sinal de saída é o deslocamento da caixa, $x(t)$.

Foram testadas algumas montagens, sendo descrita a seguir apenas a montagem que forneceu resultados mais consistentes.

3.3.1 Descrição do Aparato Experimental e Instrumentação

A figura 3-21 e a foto 3-8 permitem visualizar a montagem desenvolvida para aplicação do Método Direto assim como suas principais características.

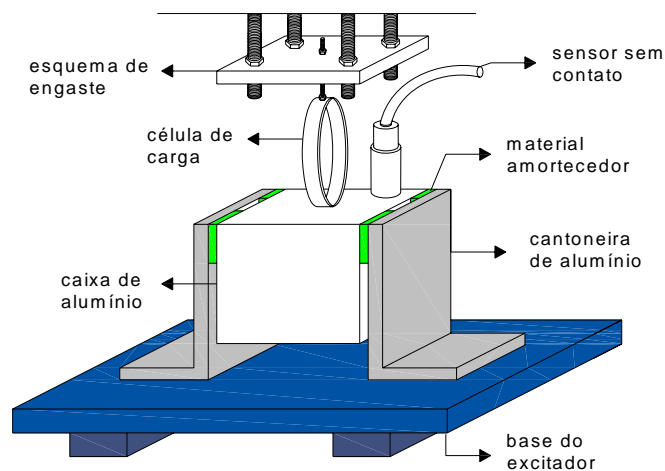


Figura 3-21 –Aparato experimental utilizado no Método Direto.



Foto 3-8 – Vista do ensaio do Método Direto.

As funções de resposta em frequência (FRF) foram obtidas através de ensaios utilizando excitações harmônica e aleatória com sinal do tipo ruído branco. O sinal de entrada foi medido através de uma célula de carga e o deslocamento da caixa foi obtido através da medição da resposta de um sensor sem contato.

A figura 3-22 indica esquematicamente a ligação dos equipamentos utilizados neste ensaio. De forma similar ao método anterior, os sinais no tempo dos sensores, após serem condicionados e filtrados, são transformados para o domínio da frequência através de um analisador de espectros que estima a FRF.

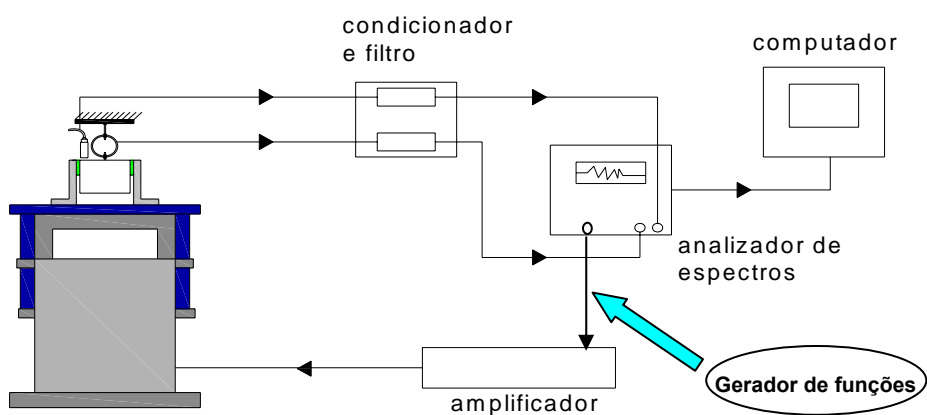


Figura 3-22 – Esquema de montagem do ensaio do Método Direto.

3.3.2 Resultados Obtidos para o Módulo Cisalhante e Fator de Perda Aplicando o Método Direto

Para as excitações aleatória e harmônica, foram realizados quatro ensaios nas mesmas condições que apresentaram resultados idênticos de G e η , em um intervalo de frequências entre 0 e 10 Hz. As frequências de excitação nos ensaios harmônicos foram: 0,1; 0,2;...0,5; 1; 2;...10 Hz. As figuras 3-23 e 3-24, apresentam os resultados obtidos para G e η , respectivamente.

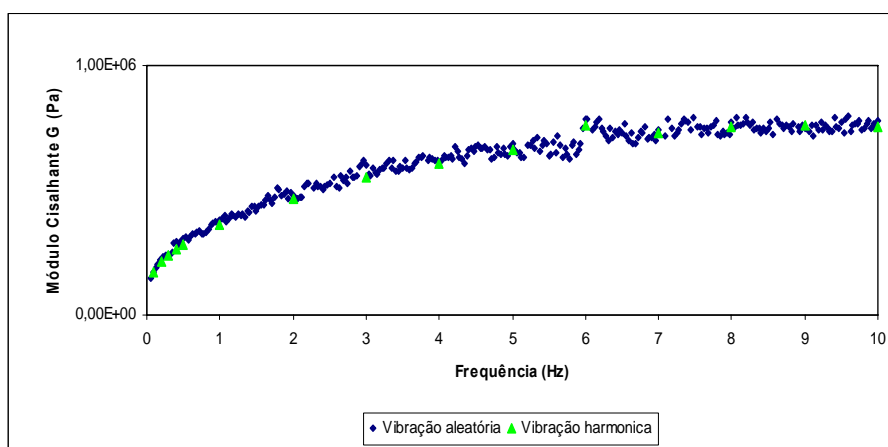


Figura 3-23 – Módulo cisalhante G do material VHB submetido a vibrações aleatória e harmônica.

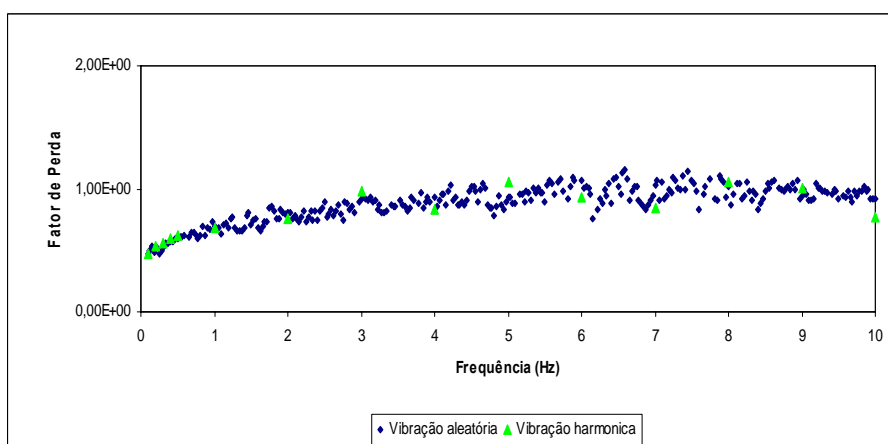


Figura 3-24 – Fator de perda η do material VHB submetido a vibrações aleatória e harmônica.

Nota-se nestas figuras que os pontos das curvas de G e η apresentam uma menor dispersão em relação aos resultados obtidos no Método Indireto. Além disso, observa-se que os resultados obtidos com as excitações aleatória e harmônica são muito próximos.

A fim de simular algumas situações que visam um entendimento melhor do comportamento de G e η foram realizados ensaios variando a espessura e o comprimento de material viscoelástico aplicado entre a massa e a cantoneira. Esses testes foram realizados utilizando-se apenas a excitação aleatória.

⇒ **Variação no comprimento do material viscoelástico**

Foram realizados quatro ensaios nas mesmas condições, onde o comprimento l do material viscoelástico foi duplicado. Os resultados desses quatro testes foram idênticos. As figuras 3-25 e 3-26 mostram os resultados de G e η para um comprimento de material VHB duas vezes maior comparados com os resultados do VHB “original”.

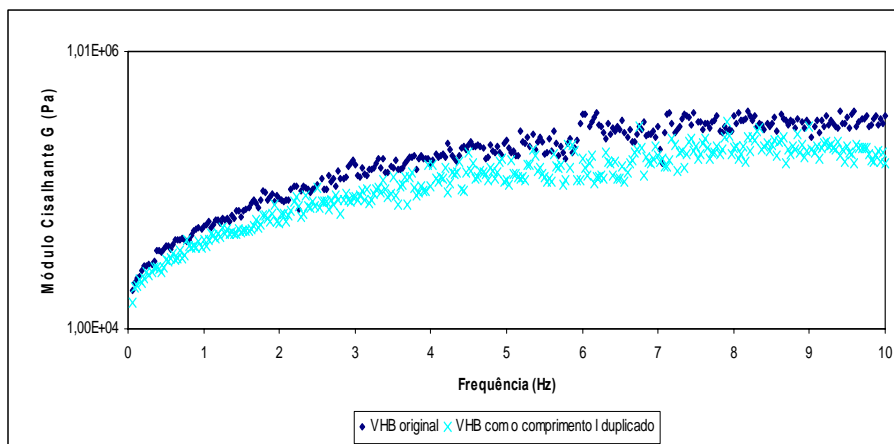


Figura 3-25 – Módulo Cisalhante G do material VHB para o comprimento l duplicado.

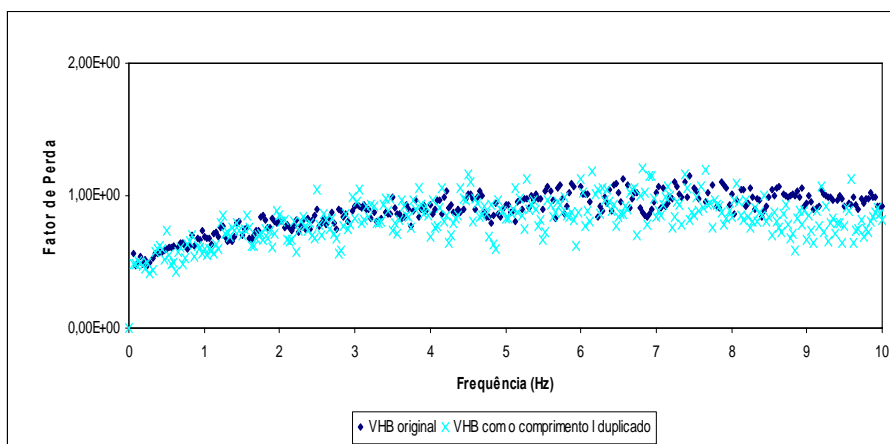


Figura 3-26 – Fator de Perda η do material VHB para o comprimento l duplicado.

Através das figuras 3-25 e 3-26 observa-se que as curvas de G e η , para o aumento de comprimento do material VHB, apresentam uma certa dispersão dos pontos. Esse fato pode ter ocorrido devido ao aumento da rigidez $K(\omega)$ do material VHB. Esse acréscimo da rigidez, mantida a mesma força de excitação, induz a massa a deslocamentos menores diminuindo a relação sinal/ruído do sensor de deslocamento. Por outro lado, também não foi possível aumentar a força de excitação, pois o excitador já estava atuando com a sua capacidade máxima.

⇒ **Variação na espessura do material viscoelástico**

Após esta etapa, foram realizados quatro ensaios nas mesmas condições, os quais deram resultados idênticos, onde a espessura do material viscoelástico, h , foi duplicada. Esses testes foram realizados com o comprimento, l , também duplicado. A foto 3-9 mostra uma vista da caixa, onde a duplicação da espessura do material VHB foi feita através da colagem de uma outra camada de VHB, de mesmas dimensões, sobre o VHB original. Através das figuras 3-27 e 3-28 pode-se observar os resultados de G e η para uma espessura de material VHB duas vezes maior, com o comprimento l também duplicado.

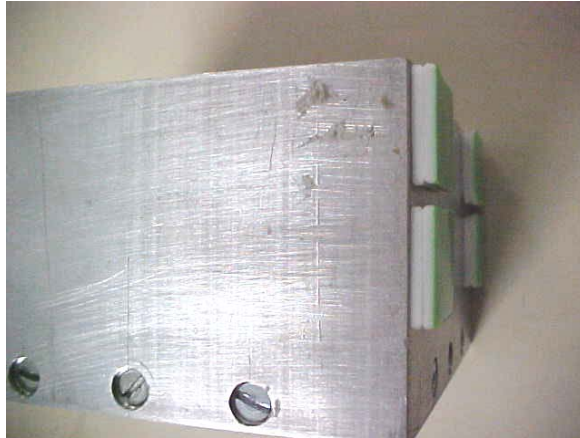


Foto 3-9 – Vista da caixa com a duplicação da espessura h e do comprimento l do material VHB.

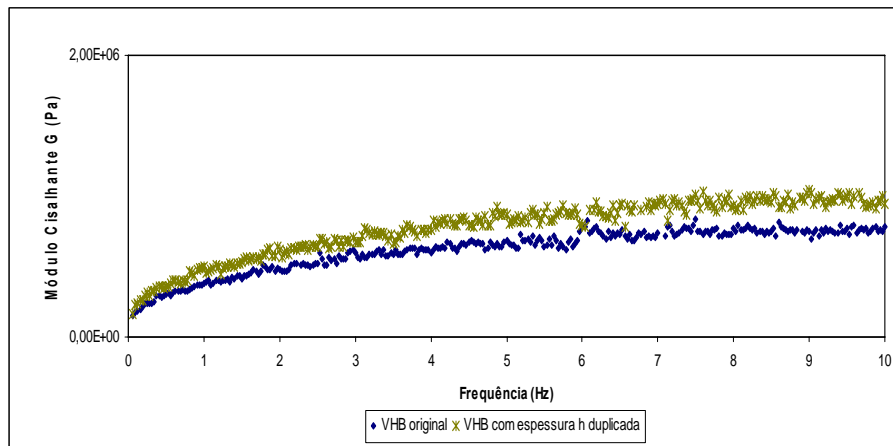


Figura 3-27 – Módulo Cisalhante G do material VHB para a espessura h duplicada.

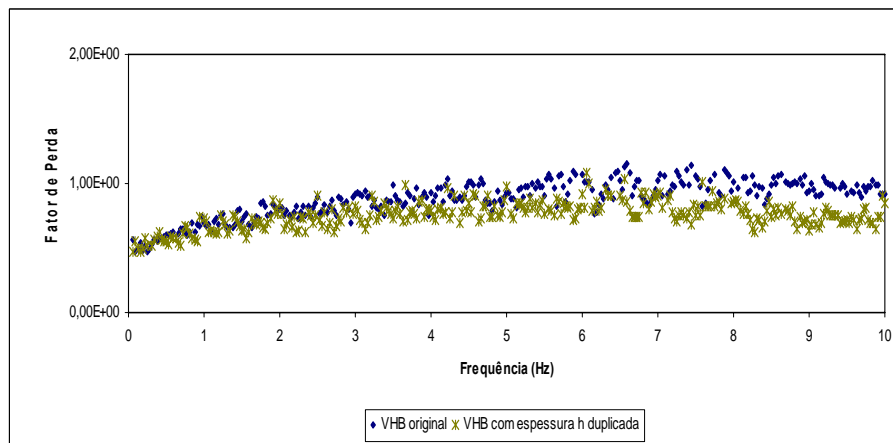


Figura 3-28 – Fator de Perda η do material VHB para a espessura h duplicada.

Nas figuras 3-27 e 3-28 pode-se observar uma menor dispersão dos pontos nas curvas de G e η . Esse fato pode ter ocorrido devido a diminuição da rigidez $K(\omega)$ em função do aumento da espessura do material VHB.

Observa-se nessas figuras um pequeno “desvio” das curvas de G e η em relação as curvas originais. Em vista da dificuldade de se obter uma amostra de material viscoelástico com a espessura, duplicada, foi realizada a colagem de um material viscoelástico sobre o outro. Esta colagem pode ter afetado o comportamento do material VHB e provavelmente provocado o desvio observado.

3.4 Caracterização Estática dos Materiais Viscoelásticos

Neste item é apresentada a metodologia empregada em um teste estático do material VHB utilizado, bem como os seus resultados. O principal objetivo desse tipo de teste é obter o módulo de cisalhamento estático. Além disso este experimento também permitiu obter a função de fluência do material. A idéia é que no futuro este tipo de resposta, possa ser utilizada para validar as metodologias de caracterização empregadas neste trabalho e do ajuste de funções que descrevam este comportamento. Deve-se ressaltar que esta tarefa não faz parte do escopo dessa tese, pois isto demandaria o desenvolvimento de uma ferramenta numérica.

A metodologia utilizada para este teste é descrita a seguir:

- ⇒ Foi utilizado o mesmo aparato experimental dos Métodos Indireto e Direto, sendo adaptado uma pequena haste no centro da caixa de alumínio, funcionando como um centralizador das massas adicionadas na caixa;
- ⇒ Foi utilizado apenas o sensor de deslocamento com a finalidade de medir os deslocamentos da caixa provocado pelos pesos que foram sendo adicionados;
- ⇒ Após ter sido realizado a montagem experimental foi iniciado o ensaio através da colocação de pesos de 500 gf na caixa de alumínio. Foram adicionados 11 pesos, totalizando 5.500 gf ;
- ⇒ Após um certo tempo, no qual o deslocamento aparentava ter se estabilizado em um valor, foi realizado o descarregamento através da retirada dos pesos,

mantendo-se a medição do deslocamento. Esta medição foi realizada até que o sistema retornasse à sua posição inicial.

As fotos 3-10 e 3-11 permitem entender melhor como foi realizado este ensaio.

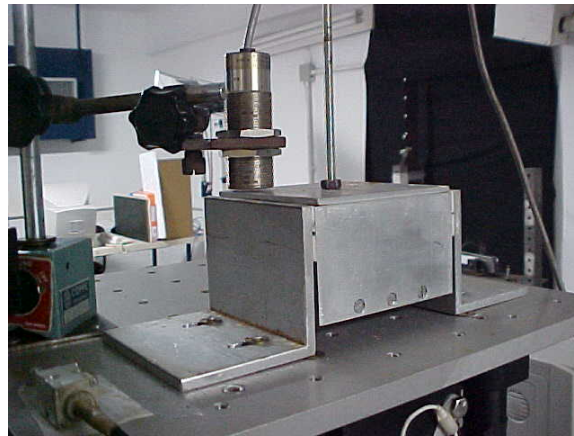


Foto 3-10 – Montagem do ensaio de fluência do material VHB.

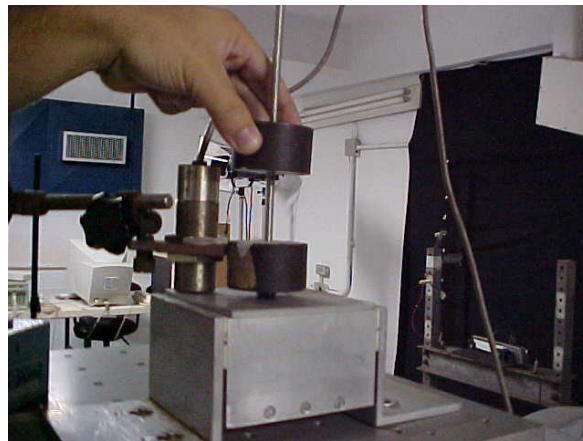


Foto 3-11 – Detalhe da instalação dos pesos.

A figura 3-29 mostra o comportamento do material viscoelástico submetido ao ensaio de fluência.

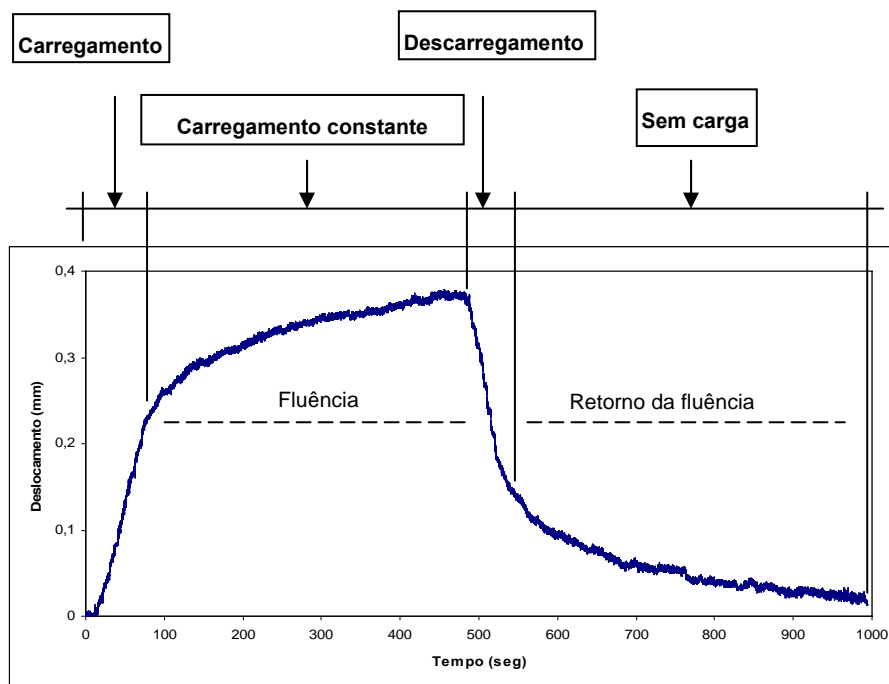


Figura 3-29 – Ensaio de fluência realizado com o material VHB.

Pode-se observar através da figura 3-29 que o intervalo de tempo onde encontra-se a fase de carregamento está aproximadamente entre 10 e 90 segundos. Após essa fase o deslocamento foi medido até um ponto de estabilização, que corresponde ao tempo de 470 segundos e deslocamento de 0,37 mm. Neste trecho entre, aproximadamente 90 e 470 segundos, ocorre a fluência do material VHB. Em seguida, é realizado o descarregamento, onde as massas são retiradas da caixa, e após essa fase se dá início ao retorno da fluência.

A partir desse ensaio foi possível obter a rigidez estática do material VHB, utilizando o trecho de carregamento. A figura 3-30 ilustra a curva, força versus deslocamento, obtida.

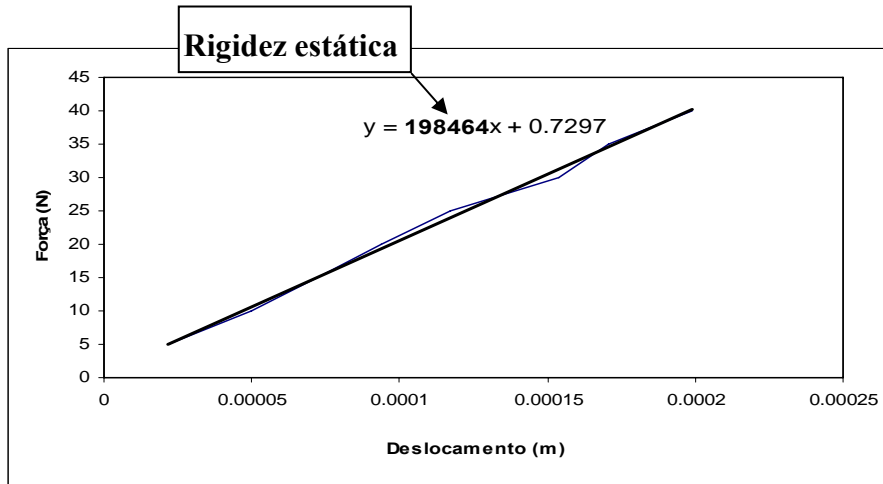


Figura 3-30 – Rigidez estática do material VHB utilizando o trecho de carregamento.

O valor do módulo cisalhante estático ($G_{\text{estático}} = 97.300 \text{ Pa}$) foi estimado através da rigidez estática obtida, na figura 3-30. A figura 3-31 mostra o mesmo gráfico da figura 3-23, na faixa de frequência de 0 a 2 Hz, com o resultado do módulo cisalhante estático inserido.

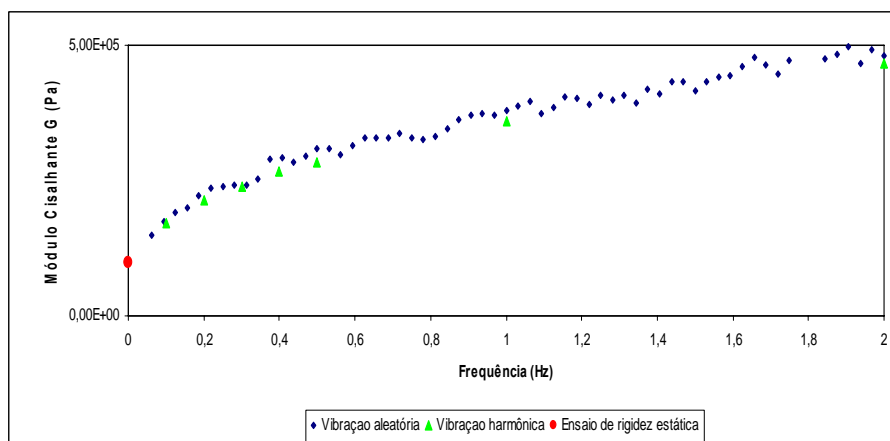


Figura 3-31 – Módulo Cisalhante G estático do material VHB.

A obtenção do módulo cisalhante G estático foi importante para colaborar na avaliação da consistência dos métodos utilizados na obtenção de G dinâmico. Nota-se

na figura 3-31 que se a curva obtida para o módulo cisalhante G dinâmico for prolongada até o eixo das ordenadas, na frequência igual a zero, obter-se-á exatamente o valor de G calculado estaticamente, este ponto está destacado em vermelho no gráfico

No próximo item, será mostrada uma comparação entre os resultados obtidos de G e η para os três métodos utilizados.

3.5 Comparação entre os métodos utilizados

O Método padronizado pela ASTM é um ensaio utilizado internacionalmente e os dados experimentais necessários para caracterização do material VHB podem ser obtidos de forma simples e com uma boa precisão, principalmente quando os ensaios são realizados para frequências mais altas, como podem ser observados na tese de Mestrado de FAISCA (1998) [2]. Normalmente, por esse motivo é um método utilizado como referência para os outros métodos. Porém neste trabalho, considerando-se que o objetivo era obter uma boa estimativa das características em baixas frequências, o Método da ASTM apresentou baixa precisão, principalmente, para os valores referentes as duas primeiras frequências, tendo maior precisão nos demais valores.

As figuras 3-32 e 3-33 ilustram as comparações entre os três métodos utilizados neste trabalho para caracterização dos materiais viscoelásticos em uma faixa de frequência entre 0 e 10 Hz. Nessas figuras os resultados apresentados para o Método Indireto, são os relativos aos testes com adição de massas (vide figuras 3-8 e 3-19).

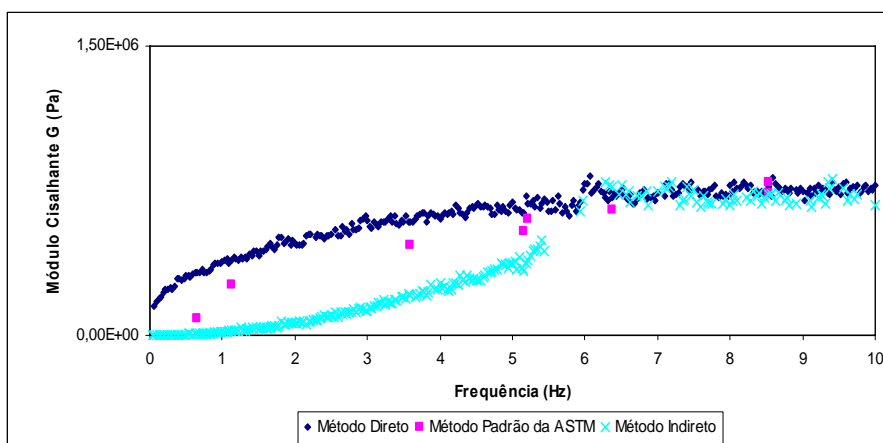


Figura 3-32 – Comparações do Módulo Cisalhante G do material VHB.

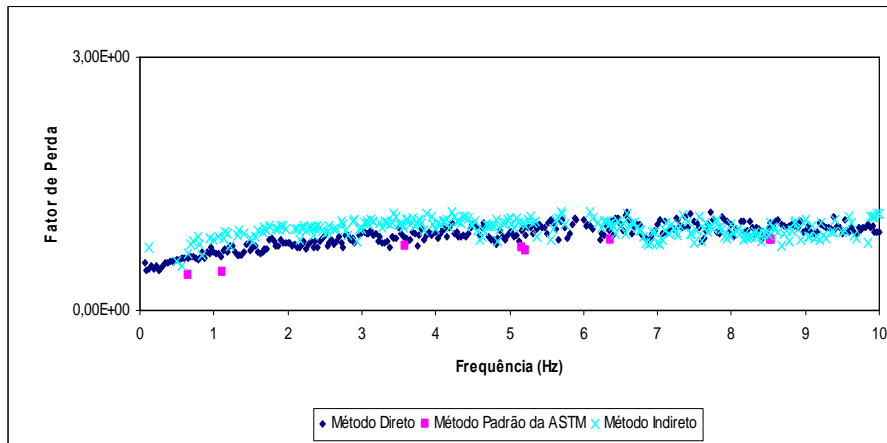


Figura 3-33 – Comparações do Fator de Perda η do material VHB.

Observa-se nessas figuras que os resultados obtidos para G pelo Método Indireto na faixa de frequências entre 0 e 6 Hz são bastante distintos dos demais métodos. Este método apresenta uma boa correlação para as frequências acima de 6 Hz. Em torno de 6 Hz verifica-se uma certa dispersão dos resultados para os valores de G . Este fato pode ter ocorrido devido a uma excitação da frequência natural do sistema, resultando em um pico em torno desta frequência.

Os métodos ASTM e Direto apresentaram resultados bastantes semelhantes para G e η , com exceção dos valores referentes as duas primeiras frequências do método ASTM (0,65 e 1,12 Hz). Essa diferença, conforme já mencionado anteriormente, se deve provavelmente a grande esbeltez das vigas ensaiadas no método ASTM para estas frequências.

O resultado de G obtido estaticamente correlacionado com o obtido dinamicamente na figura 3-31, foi extremamente importante para certificar que o Método Direto apresentou resultados mais consistentes para G que o Método da ASTM. Por esse motivo e devido a baixa precisão dos valores obtidos para as duas primeiras frequências do Método ASTM, pode se concluir que o Método Direto apresentou melhores resultados para a faixa de frequência de análise.

Apesar do Método da ASTM ser um método padronizado, só permite a obtenção das características do material VHB para as frequências naturais da estrutura, dificultando a sua utilização na prática. Os Métodos Direto e Indireto possuem a vantagem de obter um maior número de pontos para valores de G e η , porém o Método

Indireto, neste caso, está bastante comprometido para as baixas frequências devido as limitações do excitador.

4. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE ALGUMAS CONCEPÇÕES DE VIGAS SANDUÍCHES

Os *risers* rígidos normalmente chegam a plataforma em trechos de elementos tubulares de aço, sendo estes conectados na plataforma. Esta operação de conexão, devido aos elevados custos envolvidos nas operações em alto mar, deve ser executada no menor tempo possível. Como a idéia básica é que os trechos de *risers* já sejam confeccionados com as camadas necessárias para torná-los vigas sanduíche, resta a dúvida se seria necessário providenciar algum tipo de tratamento nessas juntas, a fim de dar continuidade a essas vigas sanduíche.

Este capítulo tem como objetivo avaliar a influência da não continuidade entre os trechos de *riser* nas frequências naturais e nas taxas de amortecimento. No caso de diminuição das taxas de amortecimento, também são investigadas algumas estratégias, para tentar aumentar ou restabelecer, os valores das taxas de amortecimento originais.

No próximo item é apresentada uma descrição dos tipos de concepções de vigas sanduíche utilizadas nos testes e são analisadas algumas possíveis estratégias de se obter aumento da taxa de amortecimento, mesmo quando não há continuidade entre trechos de vigas sanduíche.

Com o objetivo de avaliar a influência da não continuidade na camada de restrição, foram idealizados três tipos de vigas sanduíches, os quais são ilustrados na figura 4-1 apresentada no próximo item.

4.1 Tipos de concepções de viga sanduíche utilizados nos ensaios

As vigas sanduíches sem descontinuidade, apresentadas na figura 4-1 (a), foram aproveitadas para confeccionar a concepção da figura 4-1 (b) e posteriormente, a apresentada na figura 4-1 (c). A figura 4-1 (a) representa a mesma estrutura utilizada no Método da ASTM, a figura 4-1 (b) representa essa mesma estrutura, porém sem uma base de engaste de uma das vigas, e a figura 4-1 (c) representa a estrutura anterior com uma descontinuidade no centro da camada de restrição.

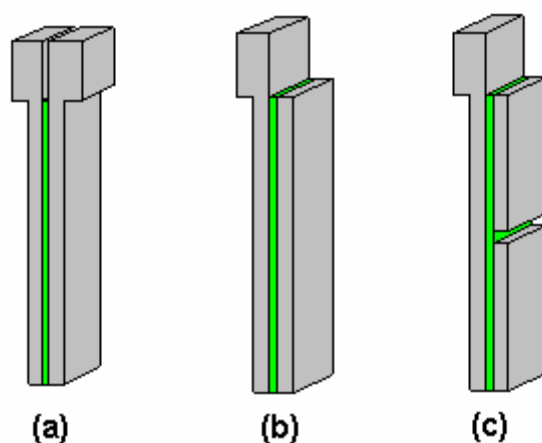


Figura 4-1 – Tipos de concepções de viga sanduíche.

As fotos 4-1 e 4-2 ilustram as concepções apresentadas nas figuras 4-1 (b) e 4-1 (c), respectivamente. A concepção apresentada na figura 4-1 (a) está ilustrada no capítulo 3, foto 3-4.

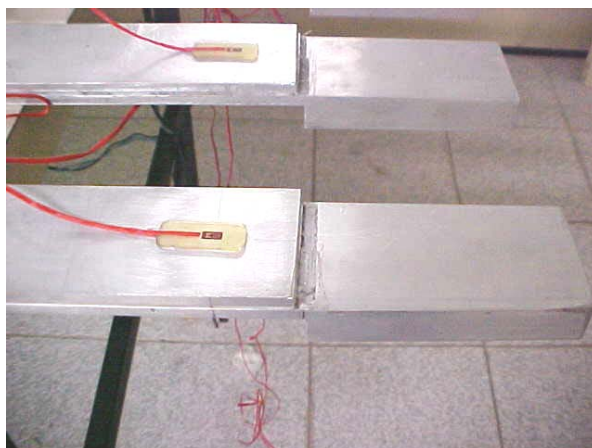


Foto 4-1 – Vigas sanduíche sem base de engaste.



Foto 4-2 – Viga sanduíche sem base de engaste e sem continuidade na camada de restrição.

Para um melhor entendimento, as barras de alumínio que estão representadas na figura 4-1 serão chamadas de concepção:

- ⇒ Tipo 1 (T1), as barras representadas pela figura 4-1 (a);
- ⇒ Tipo 2 (T2), as barras representadas pela figura 4-1 (b);
- ⇒ Tipo 3 (T3), as barras representadas pela figura 4-1 (c).

Foram realizados ensaios similares aos do Método da ASTM com os três tipos de concepções de viga sanduíche e, da mesma forma, foi preciso aplicar impactos, cuidadosamente, em uma região próxima ao ventre para que os modos de vibração fossem excitados, de forma que não se excitem modos associados a torção, conforme foi abordado no item 3.1.1.

As propriedades dinâmicas das três concepções foram obtidas através da técnica STFT (Short Time Fourier Transform).

As figuras 4-2 e 4-3 mostram as respostas obtidas no domínio do tempo e frequência, respectivamente, para a viga sanduíche VS₄ – c / T2, concepção tipo 2.

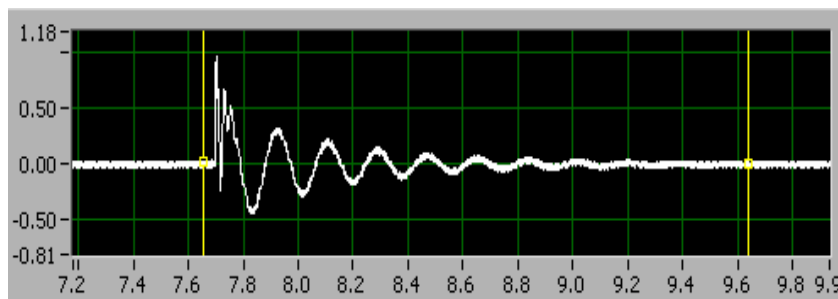


Figura 4-2 – Resultado obtido no domínio do tempo para a barra VS₄ – c / T2.

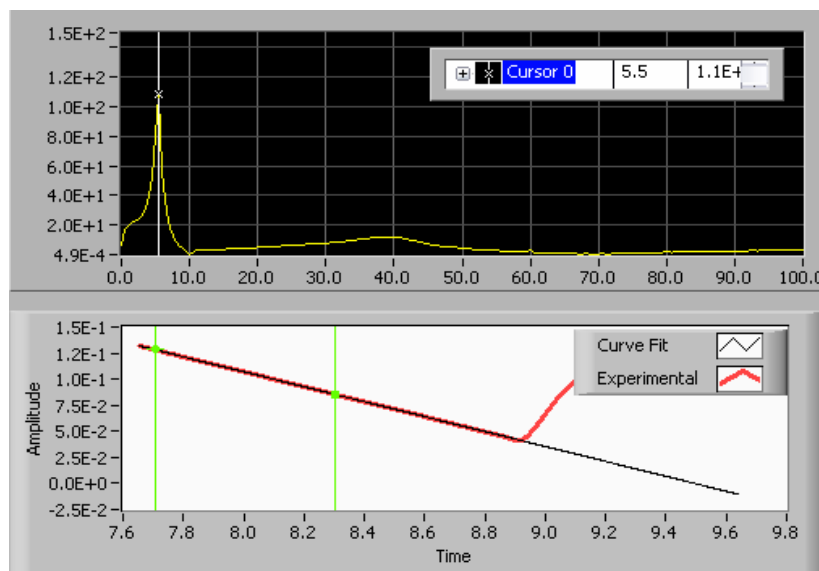


Figura 4-3 – Resultado obtido no domínio da frequência para a barra VS₄ – c / T2.

Nota-se nessas figuras que foi possível excitar os dois primeiros modos de vibração da viga (5,43 e 39,05 Hz) e através da figura 4-3 observa-se o bom ajuste obtido para o taxa de amortecimento associada ao primeiro modo.

A tabela 4-1 mostra as frequências naturais e as taxas de amortecimento obtidas para todas as concepções de viga sanduíche referentes ao primeiro e segundo modos de vibração. Os valores médios e desvio padrão de cada um dos parâmetros foram obtidos a partir de 6 amostras.

Tabela 4-1 – Resultados obtidos para os três tipos de concepções de viga sanduíche.

Estrutura	ω_1 (Hz)		ξ_1 (%)		ω_2 (Hz)		ξ_2 (%)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Viga Sanduíche - concepção T1								
VS₁- a / T1	1,17	0,04	8,21	0,07	5,15	0,08	15,22	0,25
VS₂- b / T1	2,07	0,05	8,69	0,11	10,08	0,17	16,80	0,15
VS₃- c / T1	8,25	0,04	14,22	0,07	39,00	0,35	12,11	0,07
VS₄- c / T1	8,02	0,33	14,30	0,10	38,26	0,73	11,63	0,30
VS₅- d / T1	12,47	0,11	16,70	0,07	61,65	0,47	10,57	0,15
VS₆- d / T1	12,66	0,32	16,34	0,37	62,84	0,43	11,10	0,25
Viga Sanduíche - concepção T2								
VS₁- a / T2	0,76	0,03	7,01	0,24	5,74	0,05	11,35	0,22
VS₂- b / T2	1,34	0,01	7,71	0,08	10,24	0,06	11,77	0,17
VS₃- c / T2	5,59	0,10	7,41	0,14	40,01	0,43	15,89	0,15
VS₄- c / T2	5,43	0,10	7,40	0,13	39,05	0,24	16,16	0,16
VS₅- d / T2	8,71	0,19	6,67	0,33	61,40	0,29	14,47	0,24
VS₆- d / T2	8,66	0,14	7,11	0,15	62,31	0,38	14,56	0,45
Viga Sanduíche - concepção T3								
VS₁- a / T3	0,74	0,04	5,92	0,53	3,86	0,03	7,73	0,10
VS₂- b / T3	1,22	0,02	6,45	0,37	6,94	0,04	9,07	0,53
VS₃- c / T3	5,18	0,07	5,26	0,08	31,03	0,22	5,15	0,19
VS₄- c / T3	5,04	0,05	5,18	0,04	29,70	0,13	4,92	0,13
VS₅- d / T3	8,04	0,08	4,43	0,05	49,40	0,09	4,11	0,07
VS₆- d / T3	8,06	0,07	4,74	0,01	49,67	0,14	4,71	0,10

Os resultados obtidos para a viga sanduíche, concepção T1, já foram apresentados anteriormente no capítulo 3, através da tabela 3-5, e estão inseridos na tabela 4-1 apenas para efeito de comparação.

Observa-se inicialmente, na tabela 4-1, que as frequências naturais associadas ao 1º modo de vibração são reduzidas substancialmente quando comparamos os resultados da concepção T2 com a T1, e praticamente não são reduzidas entre as concepções T2 e T3. Isto já era esperado, pois a perda de seção junto ao engaste provoca uma grande diminuição de rigidez da viga associada ao 1º modo de vibração. Por outro lado a perda

de seção próximo a metade do vão da viga (concepção T3) provoca apenas uma pequena diminuição na rigidez da viga.

Esta situação se inverte quando analisamos o 2º modo de vibração, i.é, as frequências naturais praticamente não se alteram quando comparamos a situações T1 e T2, porém são bastante reduzidas quando comparamos as concepções T2 e T3. Isto, provavelmente, se deve ao fato do ventre do 2º modo de vibração estar próximo da descontinuidade imposta na concepção T3.

As figuras 4-4 e 4-5 apresentam os gráficos das taxas de amortecimento em função das frequências naturais referentes, respectivamente, ao primeiro e segundo modos de vibração para os três tipos de concepção de viga sanduíche.

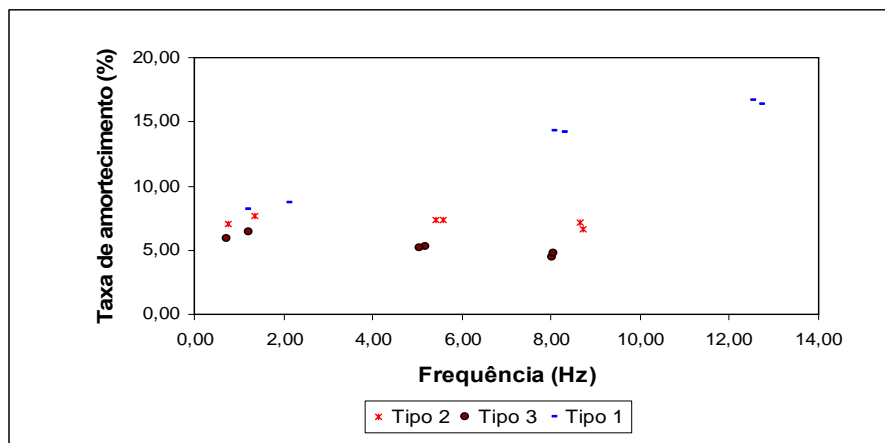


Figura 4-4 – Taxa de amortecimento das concepções T1, T2 e T3 - primeiro modo de vibração.

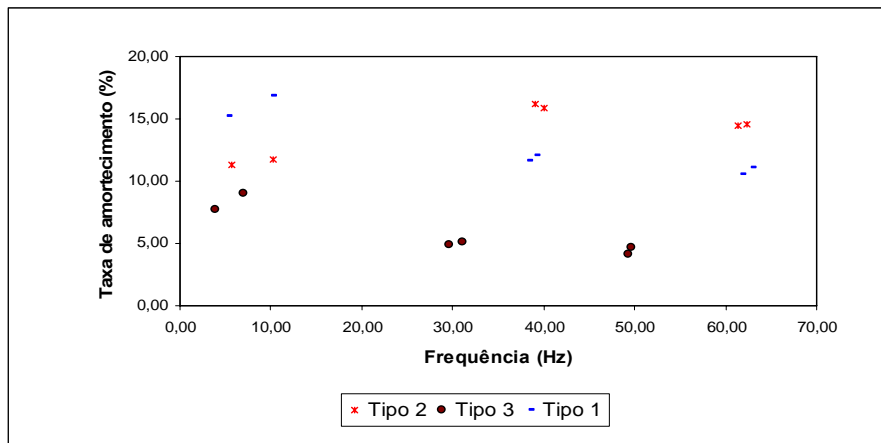


Figura 4-5 - Taxa de amortecimento das concepções T1, T2 e T3 - segundo modo de vibração.

Através da figura 4-4 e da tabela 4-1 pode-se observar uma grande diminuição do valor da taxa de amortecimento das concepções T2 e T3 em relação à T1 para o primeiro modo de vibração. A maior queda ocorre quando comparamos a concepção T1 com a T2, já que a perda de amortecimento se dá através da diminuição do esforço cisalhante no material viscoelástico. Com a retirada da base do engaste da camada de restrição, concepção T2, o material viscoelástico passa a ser menos solicitado ao esforço cisalhante, resultando em uma menor dissipação da energia de vibração da estrutura.

Da mesma forma pode ser analisada a concepção T3, devido a descontinuidade na parte central da camada de restrição, além da ausência da base do engaste nesta camada, a magnitude do esforço cisalhante no material viscoelástico diminui ainda mais, reduzindo, conseqüentemente, também o amortecimento do sistema. Deve-se destacar que a diminuição da taxa de amortecimento da concepção T3 em relação a T2 é bem menor do que a observada entre as concepções T1 e T2, já que neste caso o esforço cortante é menos influenciado pela descontinuidade induzida.

Nota-se ainda, para o 1º modo de vibração, que as maiores quedas do amortecimento são referentes as vigas VS₃, VS₄, VS₅ e VS₆, i. é, as vigas menores.

Analisando as taxas de amortecimento para o segundo modo de vibração observa-se inicialmente que as maiores reduções são obtidas quando passamos da configuração T2 para a T3. Conforme mostrado anteriormente, este comportamento também é observado em relação as frequências naturais, indicando que houve uma

perda de rigidez. Esta menor rigidez da concepção T3 para o segundo modo de vibração provavelmente implica em menor esforço cisalhante, o que acarretaria em uma diminuição da taxa de amortecimento. Comparando-se as taxas de amortecimento do segundo modo de vibração obtidas para as concepções T1 e T2, observa-se que as da concepção T2 tem uma perda para as vigas mais flexíveis (VS_1 e VS_2) e um ganho para as demais vigas.

4.2 Avaliação de estratégias para o acréscimo de amortecimento estrutural

Neste ítem são avaliadas algumas estratégias possíveis para tentar “resgatar” os níveis de amortecimento da viga sanduíche da concepção T1, o qual foi reduzido quando essas estruturas passaram pelo processo de confecção das concepções T2 e T3.

Foram testadas algumas estratégias de “recuperação” de amortecimento, porém somente será apresentada a que permitiu obter um maior ganho na taxa de amortecimento, sem alterar outras propriedades dinâmicas do sistema, como por exemplo a frequência natural da estrutura.

A estratégia utilizada consistiu em tentar restringir os deslocamentos das extremidades da camada de restrição da concepção T3. Isto foi realizado introduzindo-se parafusos nessas extremidades, conforme indicado na figura 4-6. As fotos 4-3 e 4-4 mostram detalhes dessa montagem.

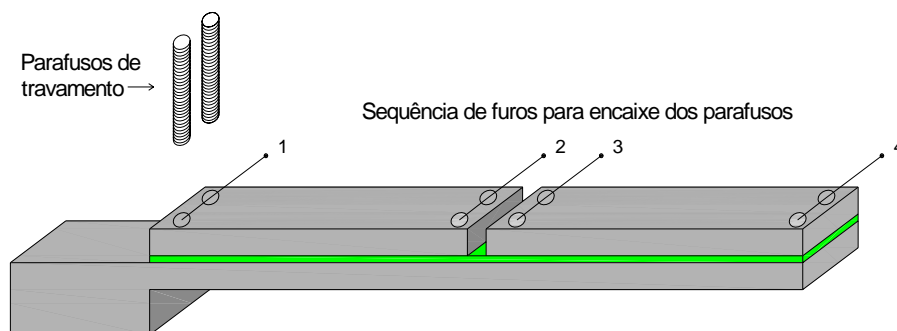


Figura 4-6 – Estratégia utilizada para o ganho de amortecimento.



Foto 4-3 – Linha de furos 2 e 3 (vide figura 4-8) rosqueadas para travamento da camada de restrição.

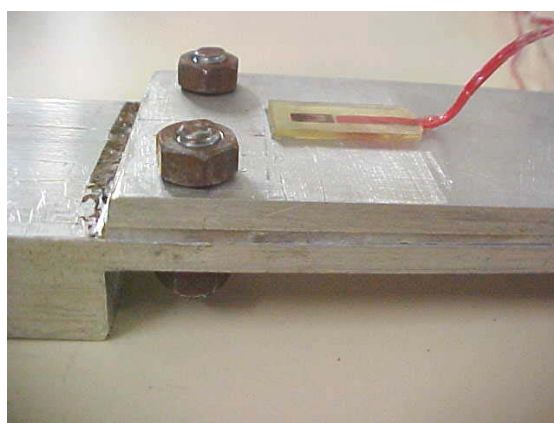


Foto 4-4 – Aplicação dos parafusos de travamento na linha de furos 1 (vide figura 4-8).

Como pode ser observado na figura 4-6 e nas fotos 4-3 e 4-4, a viga sanduíche, concepção Tipo 3, apresenta uma seqüência de quatro linhas com dois furos rosqueados em cada uma. Os furos rosqueados permitem conectar os parafusos e com isso restringir o movimento da camada de restrição quando a estrutura é deslocada, por exemplo, através de uma excitação do tipo vibração livre.

Os ensaios foram realizados testando todas as situações de travamento da camada de restrição da viga sanduíche com o objetivo de verificar qual o tipo de montagem que permite aumentar o esforço cortante no material viscoelástico,

conduzindo ao maior ganho de amortecimento. Para isto, foram selecionadas três vigas sanduíche (VS_2 , VS_4 e VS_6), concepção Tipo 3, para serem preparadas e ensaiadas utilizando esta metodologia.

4.3 Descrição dos Testes e Apresentação de Resultados

A figura 4-7 apresenta os seis tipos de testes realizados, sendo que para cada tipo foram feitos 4 ensaios. Os círculos na figura representam as linhas de furos onde os parafusos estão conectados em cada teste.

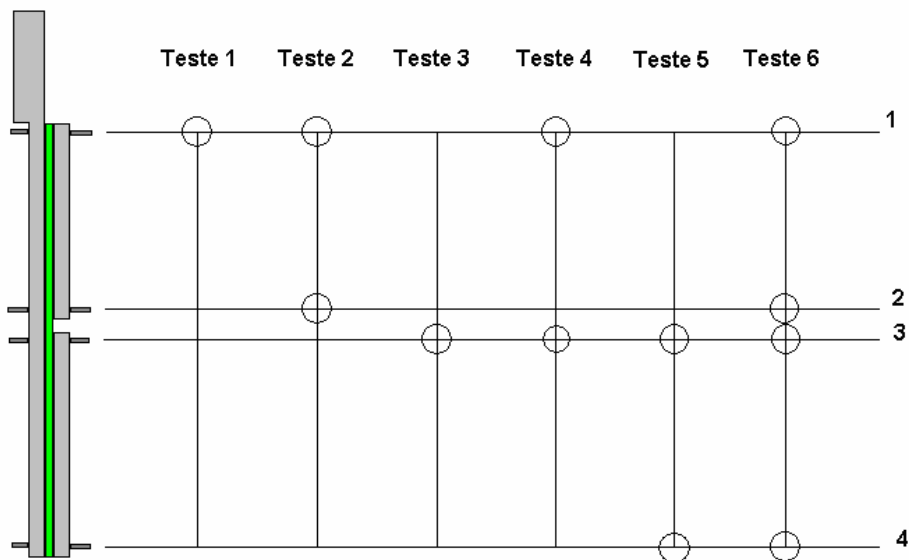


Figura 4-7 – Esquema de testes realizados nas vigas sanduíches.

Para entender melhor, descreve-se a seguir cada tipo de teste:

- ⇒ teste 1: os parafusos estão conectados apenas na linha de furos número 1;
- ⇒ teste 2: os parafusos estão conectados nas linhas de furos número 1 e 2;
- ⇒ teste 3: os parafusos estão conectados apenas na linha de furos número 3;
- ⇒ teste 4: os parafusos estão conectados nas linhas de furos número 1 e 3;
- ⇒ teste 5: os parafusos estão conectados nas linhas de furos número 3 e 4;

⇒ teste 6: os parafusos estão conectados em todas as linhas de furos.

Os ensaios foram realizados em três vigas sanduíches de concepção Tipo 3, nas quais foram preparadas as linhas de furos para a conexão dos parafusos. As estruturas Tipo 3 que foram utilizadas são: VS₂- b / T3, VS₄- c / T3 e VS₆- d / T3.

Da mesma forma que no item 4.1, para facilitar o entendimento, esta nova estrutura receberá o nome de concepção tipo 4 (T4).

As figuras 4-8 e 4-9 mostram as respostas obtidas no domínio do tempo e de frequência, respectivamente, para a estrutura VS₄ – c / T4, referente ao teste 1.

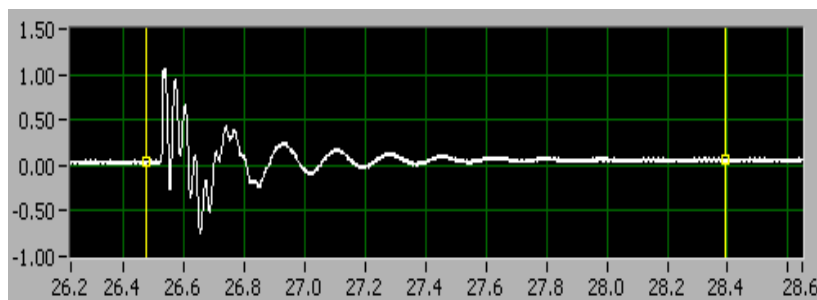


Figura 4-8 - Resultado obtido no domínio do tempo para a barra VS₄ – c / T4.

Observa-se na figura 4-8 que foi possível excitar os dois primeiros modos de vibração e o bom ajuste obtido para a taxa de amortecimento associado ao primeiro modo de vibração pode ser observado na figura 4-9. Deve-se salientar que ajustes semelhantes foram obtidos para os demais testes nos 2 modos de vibração.

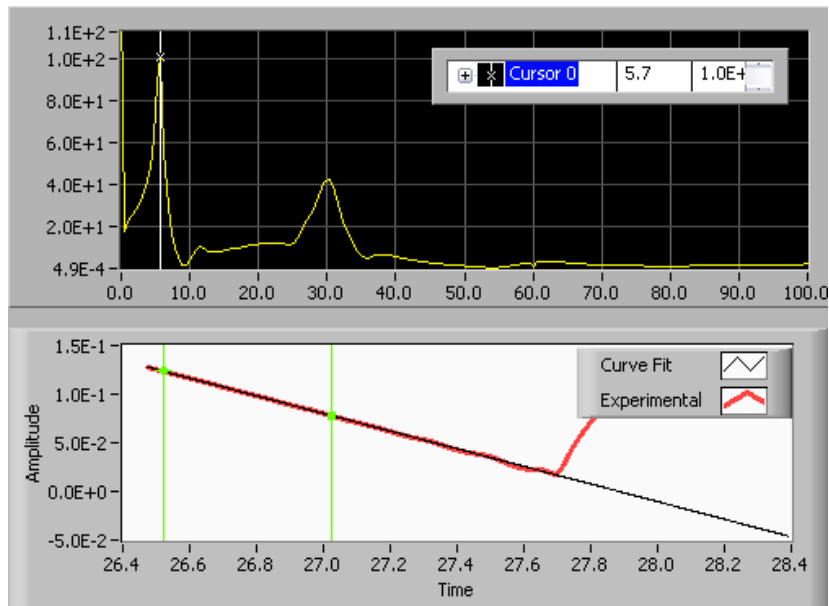


Figura 4-9 - Resultado obtido no domínio da frequência para a barra VS₄ – c / T4.

A tabela 4-2 e as figuras 4-10 e 4-11 mostram os resultados obtidos para as vigas sanduíches 2, 4 e 6 de concepção tipo 4.

Tabela 4-2 – Resultados obtidos para as vigas sanduíches 2, 4 e 6 da concepção T4.

Estrutura	ω_1 (Hz)		ξ_1 (%)		ω_2 (Hz)		ξ_2 (%)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Viga Sanduíche 2- concepção tipo 4								
VS ₂ - Teste 1	1,49	0,05	9,52	0,24	6,96	0,13	9,27	0,26
VS ₂ - Teste 2	1,80	0,01	4,24	0,32	7,32	0,08	9,79	0,40
VS ₂ - Teste 3	1,21	0,04	6,68	0,12	7,26	0,08	7,74	0,12
VS ₂ - Teste 4	1,46	0,05	9,88	0,69	7,60	0,04	8,51	0,15
VS ₂ - Teste 5	1,17	0,08	7,11	1,05	7,25	0,11	6,90	0,42
VS ₂ - Teste 6	1,80	0,04	4,53	0,25	8,20	0,07	9,94	0,45
Viga Sanduíche 4 – concepção tipo 4								
VS ₄ - Teste 1	5,73	0,21	9,28	0,30	30,26	0,29	5,90	0,07
VS ₄ - Teste 2	7,20	0,02	3,07	0,10	30,21	0,23	6,83	0,10
VS ₄ - Teste 3	5,01	0,02	4,43	0,04	30,22	0,28	6,04	0,11
VS ₄ - Teste 4	5,60	0,08	9,71	0,16	30,29	0,21	6,83	0,11
VS ₄ - Teste 5	4,98	0,21	4,18	0,37	31,64	0,19	4,47	0,02
VS ₄ - Teste 6	7,20	0,06	2,71	0,14	32,53	0,07	5,97	0,22
Viga Sanduíche 6 – concepção tipo 4								
VS ₆ - Teste 1	9,28	0,08	8,78	0,13	50,00	0,30	4,85	0,06
VS ₆ - Teste 2	11,73	0,13	2,63	0,27	49,50	0,16	5,74	0,07
VS ₆ - Teste 3	11,01	0,16	5,07	0,32	49,43	0,12	5,10	0,04
VS ₆ - Teste 4	9,22	0,22	8,81	0,45	49,67	0,04	5,01	0,00
VS ₆ - Teste 5	10,69	0,08	6,54	0,12	51,67	0,37	5,67	0,04
VS ₆ - Teste 6	11,43	0,06	2,18	0,13	51,35	0,18	6,28	0,18

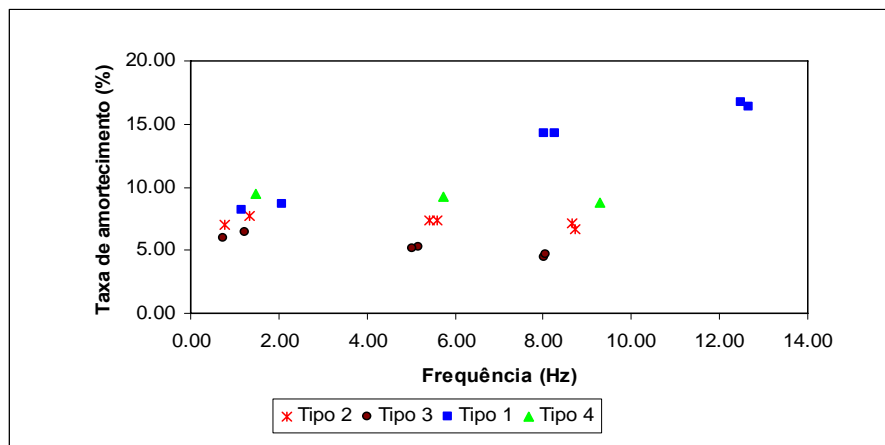


Figura 4-10 - Resultados obtidos referentes ao primeiro modo de vibração, para a viga sanduíche concepção tipo 4, teste 1.

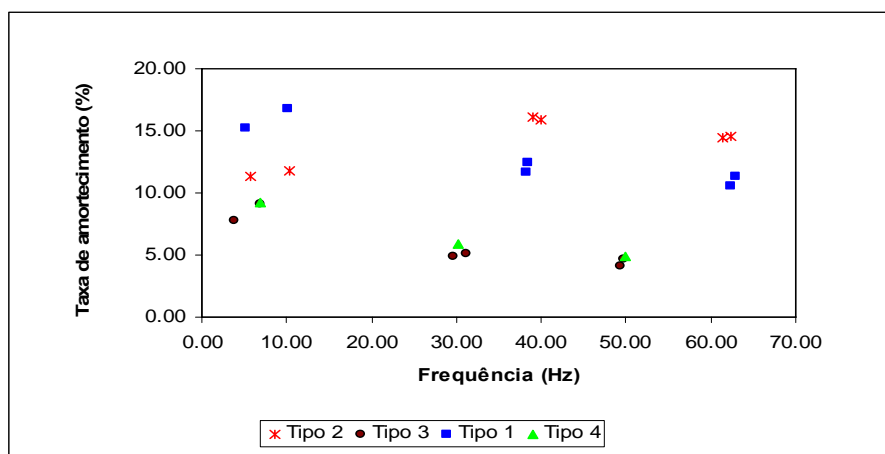


Figura 4-11 - Resultados obtidos referentes ao segundo modo de vibração, para a viga sanduíche concepção tipo 4, teste 1.

Através da tabela 4-2 observa-se que as maiores taxas de amortecimento associadas ao primeiro modo de vibração foram obtidas aplicando a montagem realizada nos testes 1 e 4. Para ambas as montagens os resultados são semelhantes, entretanto em comparação com as demais montagens observa-se uma enorme diferença na taxa de amortecimento.

Como pode ser observado na figura 4-7 as montagens dos testes 1 e 4 travam apenas uma linha de furos da camada de restrição. Como a outra extremidade está livre para se deslocar, um esforço cisalhante é induzido no material viscoelástico, conduzindo a um acréscimo da taxa de amortecimento. Este acréscimo é relevante, chegando a superar os valores obtidos para as concepções T2 e T3, conforme pode ser observado na figura 4-10. Deve-se destacar, no entanto, que os valores obtidos não chegam a alcançar os de concepção T1, isto é, onde a camada de restrição é contínua.

Quando a camada de restrição é travada em duas linhas de furos, como é o caso das montagens nos testes 2, 5 e 6, o movimento relativo entre a camada de restrição e a estrutura principal fica parcialmente restringido, diminuindo o esforço cortante no material VHB e a taxa de amortecimento. Isto é evidenciado através dos resultados mostrados na tabela 4-2.

Através dos resultados obtidos pode-se afirmar que, para o primeiro modo de vibração, é possível se recuperar parcialmente a taxa de amortecimento quando a

camada de restrição passa a ser descontínua. Para isto é necessário restringir a camada de restrição em uma das extremidades e deixar a outra extremidade livre.

Em relação ao segundo modo de vibração, os resultados obtidos para essa técnica são semelhantes aos resultados obtidos para a concepção tipo 3, como pode ser observado na figura 4-11. Desta forma, pode-se afirmar que com as estratégias utilizadas não foi possível se obter acréscimo de amortecimento quando existe descontinuidade na camada de restrição.

Analisando-se os resultados obtidos para as frequências naturais associadas ao 1º modo de vibração (vide tabela 4-2) nota-se que os testes 2 e 6 apresentam as maiores frequências naturais, mas não chegam a alcançar os valores observados para a concepção T1 (vide tabela 4-1), isto é, quando a viga é contínua. Em relação ao 2º modo de vibração pode-se observar que, de uma forma geral, elas não são muito influenciadas pelas estratégias adotadas para tentar obter ganho de amortecimento.

5. COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentados alguns comentários finais sobre os resultados apresentados ao longo deste trabalho. Na seqüência, são abordadas algumas sugestões que podem servir de base para futuros trabalhos.

A caracterização dos materiais viscoelásticos, para baixas frequências, foi uma das principais etapas deste trabalho. A obtenção dos parâmetros de caracterização dos materiais viscoelásticos é fundamental para o desenvolvimento de modelos computacionais capazes de projetar estruturas mais viáveis e seguras na prática, para esta faixa de frequências. Dentre os métodos aplicados de caracterização de materiais viscoelásticos pode-se concluir que o Método Direto foi o que apresentou resultados mais coerentes para os valores de G e η , para a faixa de frequência analisada. Além disso, como já foi abordado no capítulo 3, este método possui a vantagem de obter um conjunto maior de pontos para os parâmetros G e η dos materiais viscoelásticos na faixa de frequência de interesse. O Método Indireto também possui esta vantagem, porém é um método que depende da capacidade do excitador gerar acelerações suficientes para que fosse possível medir as respostas com uma precisão adequada. Esta limitação do equipamento utilizado se mostrou mais realçada para a faixa de frequências entre 0 e 6 Hz..

O Método da ASTM apresentou bons resultados, mas para que fosse possível obter respostas na faixa de frequência de 0,5 e 1,5 Hz, respeitando as relações de espessuras definida na norma, foi necessário construir vigas tão esbeltas que apresentaram inconsistência, provavelmente, relacionadas a não uniformidade da espessura e ao alto índice de esbeltez apresentado nessas barras, ou alguma não linearidade. Pode-se concluir, portanto, que este tipo de método não é adequado para estes níveis baixos de frequência.

O módulo cisalhante estático, obtido através do ensaio estático foi de fundamental importância para certificar e dar consistência aos pontos estimados pelo Método Direto, uma vez que a extrapolação dos dados obtidos convergem claramente para o valor estimado estaticamente.

Os testes realizados interrompendo a continuidade da camada de restrição foram realizados com o objetivo de verificar a influência da descontinuidades na resposta do

sistema e algumas possíveis soluções que possam ser aplicadas na prática. Os resultados destes testes demonstraram, claramente, que a taxa de amortecimento pode ser reduzida pela descontinuidade da camada de restrição, e que cada modo de vibração pode ser afetado de forma diferente. Outro aspecto importante que pode ser observado nestes resultados, diz respeito a forma pela qual deve-se reparar a camada de restrição, já que em algumas situações apresentadas, o fato de restringir a camada totalmente, acabou por limitar a capacidade de aumentar a taxa de amortecimento do sistema.

⇒ **Sugestões para trabalhos futuros**

Inicialmente com o intuito de melhorar os ensaios do Método Direto deverão ser utilizados sensores de deslocamento que possuam uma maior resolução de leitura, minimizando, assim, as dificuldades enfrentadas para obtenção de bons resultados. Outro aspecto que deve ser investigado é um sistema mais adequado para a fixação do sensor de carga. O sistema deveria permitir um maior deslocamento do excitador sem que isto implicasse em um aumento de carga. Isto permitiria verificar a influência da variação da amplitude de deslocamento nas características dos materiais viscoelásticos.

A fim de utilizar o Método da ASTM, que se mostrou bastante preciso para uma faixa de frequência maior onde foram utilizadas vigas com dimensões mais adequadas, seria necessário reescrever as equações que governam o problema permitindo que fossem adicionadas massas à estrutura. Esta solução poderia permitir que, com somente uma viga, várias frequências fossem estudadas.

Desenvolver metodologias para ajustar funções matemáticas que descrevam o comportamento dos materiais viscoelásticos aos resultados experimentais. Estas funções são fundamentais para a utilização destes resultados em modelos numéricos. Um outra sugestão, para trabalhos futuros, seria utilizar os resultados do ensaios de fluência ou mesmo de relaxação para verificar se os parâmetros obtidos nos ajustes das funções são adequados.

Uma forma de enriquecer, ainda mais, as análises sobre as verificações de concepções de vigas sanduíches é aplicando-se outros tipos de concepções, como por exemplo, inserindo, na estrutura, múltiplas camadas de materiais viscoelásticos e

restrição ou aplicando mais descontinuidades à camada de restrição e ao material viscoelástico, simulando um trecho com mais elementos.

Pode-se, ainda, testar essas concepções em estruturas reais, realizando alguns testes com *risers* rígidos no Laboratório de Estruturas da COPPE, desse modo, verificando, de fato, o comportamento dessas concepções em estruturas tubulares.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Nashif, Ahid D.; Jones, David I. G.; Henderson, J P., “Vibration Damping”, A Wiley-Interscience Publication – Jonh Wiley & Sons Inc., 1985.
- [2] FAISCA, R.G., Caracterização de Materiais Viscoelásticos como Amortecedores Estruturais. Tese de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.
- [3] PITELA, B.D.A., Investigação da Eficiência de Materiais Viscoelásticos para Redução de Vibrações em Risers. Tese de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- [4] LAZAN, B. J., *Damping of Materials and Members in Structural Mechanics*, 1ed. New York, Pergamon Press, 1968.
- [5] Kerwin Jr., E. M., “Damping of Flexural Waves by a Constrained Viscoelastic Layer”, *Journal of the Acoustical Society of América*, v. 31, nº 7, pp. 952 – 962, 1959.
- [6] 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.
- [7] Oberst, H.; Frankenfeld, K., “Über die Dämpfung der Biegeschwingungen dünner Bleche durch festhaftende Beläge”, *Acústica*, v.2, pp. 181-194, 1952.
- [8] Deng, R., Davies, P., & Bajai, A. K., 2003. Flexible polyurethane foam modelling and identification of viscoelastic parameters for automotive seating applications. *Journal of Sound and Vibration* 262, 391-417.
- [9] Singh, R., Davies, P., & Bajaj, A. K., 2003. Estimation of the dynamical properties of polyurethane foam through use of Prony series. *Journal of Sound and Vibration* 264, 1005-1043.
- [10] Shi, Y., Sol, H., & Hua, H., 2006. Material parameter identification of sandwich beams by an inverse method. *Journal of Sound and Vibration* 290, 1234-1255.
- [11] CASTELLO, D. A., Modelagem e Identificação de Materiais Viscoelásticos no Domínio do Tempo. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

- [12] SANTOS, E.F., Atenuadores Viscoelásticos para Redução de Oscilações Aeroelásticas de Edifícios Altos. Tese de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [13] BARBOSA, F.S., Modelagem Computacional com Camadas Viscoelásticas Amortecedoras. Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.
- [14] MORAIS, G.T., Análise de Impactos em Vigas Usando-se o Método de Integração Explícita no Tempo. Tese de M.Sc. EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil, 2002.
- [15] Notas de aula – Dinâmica Experimental de Sistemas Estruturais, 2005.
- [16] BUCHER, H. F., Metodologias para a Aplicação de Técnicas Tempo-Frequência em Dinâmica Estrutural e ao Método dos Elementos de Contorno. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.
- [17] Sun, C. T.; Lu, Y. P., “Vibration Damping of Structural Elements”, Prentice Hall PTR, New Jersey, USA, 1995.
- [18] American Society for Testing and Materials – ASTM, “Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials”, New York, USA, Desig. E756, pp 779-785, 1993.
- [19] Masterson P. A.; Miles, R. N., “Method for the Determination of Complex Shear Modulus of Viscoelastic Adhesives”, SPIE, New York, USA, v. 2445, pp. 276-281, 1995.
- [20] Manuais de Fitas Adesivas – VHB, 3M.
- [21] Clough, R. W.; Penzien, J. J., “Dynamics of Structures”, Mc Graw-hill Book Co.

APÊNDICE 1

A seguir é apresentado a especificação de todos os sensores e equipamentos utilizados nos ensaios experimentais, abordados no Capítulo 3 e no Capítulo 4, deste trabalho.

SENSORES

⇒ Acelerômetro do tipo resistivo (1 g)

Fabricante: KYOWA

Modelo: ASW-1A

Capacidade: 1 g

Resposta em frequência: 0 a 60 Hz

⇒ Acelerômetro do tipo resistivo (2 g)

Fabricante: KYOWA

Modelo: ASW-2A

Capacidade: 2 g

Resposta em frequência: 0 a 60 Hz

⇒ Flexímetro elétrico

Fabricante: KYOWA

Modelo: DT-100A

Capacidade: 100 mm

⇒ **Célula de carga (load cell)**

Fabricante: KYOWA

Capacidade: 4 kgf

⇒ **Sensor de proximidade indutivos**

Fabricante: BALLUFF

Modelo: BALLUFF 2000 – M 30x1.5

Faixa máxima de trabalho: 2 a 10 mm

Faixa de operação linear: 3 a 8 mm

⇒ **Strain gauges**

Fabricante: KYOWA

Modelo: KFWC5L11-120

EQUIPAMENTOS

⇒ **Amplificador de sinais**

Fabricante: APS Dynamics, Inc.

Modelo: 144 DUAL-MODE Power Amplifier

Capacidade: 0 a 2000 Hz

Impedancia de entrada: 100 k ohm

Corrente de saída, máxima : 15 A rms

Corrente de pico : 21.2 A

Voltagem do sinal de entrada : 2 V, maximo

Potência de entrada : 120 V (220, 240 V opcional) 50/60 Hz, 1500 w

⇒ **Excitador Eletrodinâmico**

Fabricante: APS Dynamics, Inc.

Modelo: 400 ELECTRO-SEIS

Capacidade: 0 a 200 Hz

Deslocamento máximo : 158 mm

Velocidade : 762 mm/s

Corrente nominal (referente a calibração) : 0.1 Hz – 15.2 A

Peso : 70 kg

⇒ **Amplificador de transresistência para sensores magnéticos de deslocamento**

Impedância de entrada: 300 ohms

Impedância de saída: 22 ohms

Ganho de transresistência: de 0 a 600 ohms

Nível máximo de saída: -9V a 9V

Offset: 0V a 3V

Alimentação do sensor: 12 VDC

⇒ **Condicionador de sinais para sensores piezelétricos**

O sistema de condicionamento consiste de quatro módulos de oito canais cada, que são ligados ao computador através de interface IEEE-488 ou RS232, permitindo ao usuário o ajuste por software de ganhos e filtros passa-baixa. As principais especificações técnicas deste equipamento são:

- 32 canais por chassi
- ganho programável por canal e filtro programável por módulo
- filtro programável do tipo Butterworth, Bessel ou Elliptic
- Modo de entrada ICP ou Voltagem Direta

Excitação para Transdutores ICP: 24/10 V/mA

Excitação para Transdutores Voltagem Direta: +/- 5 V (ou +/- 10 V)

Proteção de Entrada: 50 V

Variação de ganho: 0.125 a 100

Precisão de Ganho: 1.0 %

Linearidade de Ganho: 1.0 %

Voltagem de Saída: +/- 5 V (ou +/- 10 V)

Resposta em Frequência 0.25 Hz a 50 kHz

⇒ **Condicionador de sinais para sensores resistivos**

Sensores de deformação aplicáveis: 60 a 1000Ω

Excitação de pontes: AC 2V, 0,5V, controlável

Ajuste do balanceamento do zero: R: +/- 1% (+/- 5000 μst)

Sensibilidade (10 μst de entrada) 0.2V (R_L : 5kΩ), 3mA (R_L : 30Ω)

Saída V: +/- 5V, +/- 5mA

Saída I: +/- 5V, +/- 30mA

Não-linearidade: +/- 0.1% FS

Impedância de saída: 10 Ω

Sinal de calibração: +/- 1 a 9999 μst precisão: +/- (0.5%+0.5 μst)

Ajuste de sensibilidade: 1,2,5,10,20,50,100,x100με e OFF (precisão: +/- 0.5%)

Resposta em frequência: DC a 2.5 kHz (desvio: +/- 10%)

Filtro passa-baixa: 10,30,100,1kHz, Free (amplitude de resposta: -3dB+/-1dB)

⇒ **Analizador de Espectros**

Fabricante: Hewlett-Packard

Modelo: HP35660A

Resposta em frequência: 244 μ Hz a 51,2 kHz (dual channel)

Precisão: +/- 0.003% da frequência

Resolução: variação da frequência/ 400

Nível máximo de saída: +/- 5 V

Fontes de geração de sinal: randômica, senoidal e periódica

⇒ **Filtro passa-baixa**

Frequência de corte: 1Hz a 16 kHz e passa-tudo: 30 kHz +/- 1 dB

Razão da amplitude de frequência de corte: -3dB +/- dB

Desvio da amplitude da região a passar: +/- 0.2 dB

Ganho DC: x 1 +/- 0.1%

Impedância Entrada: 100 k Ω +/- 5%, não balanceado

Voltagem entrada: 0 a +/- 10V

Voltagem saída: +/- 10V máximo

Corrente saída: +/- 20 mA máximo

Razão sinal/ruído: 66 dB_{rms}

Estabilidade zero: 0.5 mV/°C

Estabilidade ganho: +/-0.01 %/°C