

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÃO EM MATERIAIS COMPÓSITOS POR MATERIAIS
VISCOELÁSTICOS

por

Leonardo dos Santos Borsoi

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, outubro de 2022.

CIP - Catalogação na Publicação

Borsoi, Leonardo dos Santos
Atenuação de Vibração em Materiais Compósitos por
Materiais Viscoelásticos / Leonardo dos Santos Borsoi.
-- 2022.
15 f.
Orientador: Dr. Herbert Martins Gomes.
Coorientador: Me. Alexandre Marks Löw.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre,
BR-RS, 2022.

1. Material composto. 2. Identificação de
Amortecimento. 3. Material viscoelástico 4. Vibrações
mecânicas. I. Gomes, Herbert Martins, orient. II. Löw,
Alexandre Marks, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Leonardo dos Santos Borsoi

ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÃO EM MATERIAIS COMPÓSITOS POR MATERIAIS
VISCOELÁSTICOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin

Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador : Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Coorientador : Prof. Me. Alexandre Marks Löw

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Prof. Dr. Ignácio Iturrioz

Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas

Porto Alegre, outubro de 2022.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Luciano Borsoi e Yara Moema dos Santos por todo o suporte dado a mim não só durante a confecção deste trabalho, mas durante toda a duração do curso de engenharia pois sem eles nada disso teria sido possível.

Aos meus amigos e colegas, M.Sc. Engº. Otávio de Oliveira Pinto e Maria Carolina Minusso Kopacek, pelo apoio direto na confecção deste trabalho, assim como durante o andamento do curso de Engenharia Mecânica.

Ao meu orientador Prof. Dr. Herbert Martins Gomes pela orientação em diversos momentos da minha trajetória através da Universidade, pelas oportunidades concedidas, pela didática e os conhecimentos atenciosamente passados adiante.

Ao meu coorientador, Prof. Me. Alexandre Marks Löw pelo apoio e conhecimentos transmitidos em diversos momentos da minha passagem pelo curso de Engenharia Mecânica

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela inquestionável qualidade de ensino.

A todos os amigos que fiz durante a faculdade, e que contribuíram para me tornar uma pessoa melhor, pessoal e profissionalmente.

Aos demais amigos e familiares, em especial ao meu e tio Eng. Fernando Borsoi, minha inspiração para entrar no curso de Engenharia, e que acompanhou parte desta trajetória, mas infelizmente não está mais presente para apreciar o desfecho deste feito.

“The ancient Egyptians once built a pyramid at the wrong angle, and it collapsed. The next pyramid was built at the same angle until it started to collapse, at which point they completed it by changing the plan halfway and deciding it was good enough. The general form of this procedure later led to aqueducts, steam engines, space travel, Pop Rocks, and so on.”

Zach Weinersmith.

ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÃO EM MATERIAIS COMPÓSITOS POR MATERIAIS
VISCOELÁSTICOS

Leonardo dos Santos Borsoi

leonardoborsoi@hotmail.com

Resumo. *O amortecimento em materiais é um tema ainda não completamente resolvido devido à incerteza de sua origem que pode ser diversa. Materiais compósitos têm assumido cada vez mais parte do dia a dia de sistemas ora construídos com metais devido a suas características excepcionais de resistência, flexibilidade e leveza. As aplicações vão do sistema automotivo ao aeroespacial, sendo empregado para a construção de asas de aeronaves, aerogeradores, vasos de pressão, partes de carenagens entre outros. Problemas relacionados à vibração em estruturas com materiais compósitos podem surgir quando há a ressonância de carregamentos e modos de vibração. A mitigação deste fenômeno pode ser feita, até um certo nível, com o controle do amortecimento. Neste trabalho investiga-se experimentalmente o amortecimento em materiais compósitos e sua relação com camadas de materiais viscoelásticos.*

Palavras-chave: *material composto, identificação de amortecimento, material viscoelástico, vibrações mecânicas.*

Vibration attenuation in composite materials by viscoelastic materials

Abstract. *Damping in materials is a topic that has not yet been completely resolved due to the uncertainty of its origin, which can be diverse. Composite materials are increasingly becoming a part of everyday systems now built with metals due to their exceptional characteristics of strength, flexibility and lightness. The applications range from the automotive system to aerospace, being used to build aircraft wings, wind turbines, pressure vessels, and fairings parts, among others. Problems related to vibration in structures with composite materials can arise when there is resonance of loads and vibration modes. The mitigation of this phenomenon can be done, to some extent, with damping control. In this paper, we investigate experimentally the damping in composite materials and its relationship with viscoelastic material layers*

Keywords: *composite material, damping identification, viscoelastic material, mechanical vibrations.*

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
3.1	Razão de Amortecimento pelo Decremento Logarítmico	3
4	METODOLOGIA	5
4.1	Amostras para teste	5
4.2	Materiais viscoelásticos empregados	5
4.3	Matriz de testes e projeto de experimentos	6
4.4	Bancada experimental	7
4.5	Tratamento de dados	9
5	RESULTADOS	10
6	CONCLUSÕES	14
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
	ANEXO	16
	APÊNDICE	17

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva de vibração livre com amortecimento viscoso para definição do decremento logarítmico.	4
Figura 2 – Amostras de teste após realizadas as medições, numeradas de acordo com a ordem citada na Tabela 1.	6
Figura 3 – Disposição do material viscoelástico na amostra nas condições de (a) cobertura de face inteira e (b) meia face, respectivamente.	7
Figura 4 – Amostra 3, na condição de tratamento em meia face, fixada à bancada de testes.	8
Figura 5 – Medição #48, onda senoidal com amortecimento.	9
Figura 6 – FFT da medição #48, apenas um modo de vibração com valores de aceleração significantes, o primeiro modo.	9
Figura 7 – Medição #48, gráfico dos valores filtrados e curva exponencial aproximada (em vermelho).	10
Figura 8 – Gráficos sobrepostos de Frequência x Condição de tratamento.	13
Figura 9 – Gráficos sobrepostos de Razão de amortecimento x Condição de tratamento.	13
Figura A.1 – Propriedades mecânicas e térmicas das amostras de materiais compósitos.	17
Figura A.2 – Propriedades Elásticas e geométricas dos laminados empregados nos ensaios.	17
Figura A.3 – Especificações do Martelo de Impacto utilizado nos experimentos.	18
Figura A.4 – Características técnicas dos acelerômetros ADXL 335 empregados.	19
Figura A.5 – Características técnicas da placa de aquisição USB 1208-FS da Measurement Computing.	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Breve descrição e massa dos materiais viscoelásticos utilizados em cada uma das amostras	5
Tabela 2 – Matriz de testes executados durante o experimento.	7
Tabela 3 – Valores de Frequência e Razão de amortecimento médios para cada condição de teste, acompanhados de seus respectivos desvios-padrão.	11
Tabela 4 – Valores de massa, aumento de massa, aumento de Razão de Amortecimento e coeficiente.	12
Tabela A.1 – Medições válidas de Frequência e Razão de amortecimento realizadas.	16

1. INTRODUÇÃO

Materiais compósitos têm recebido bastante atenção e uso nos últimos anos, devido suas características de alta resistência e baixíssimo peso quando comparados com os usuais materiais metálicos utilizados pela indústria para a confecção de peças e equipamentos. Seu emprego é vasto, indo desde o setor aeroespacial, aeronáutico, náutico e automobilístico. Problemas de fadiga têm sido relatados quando do uso dos materiais compósitos em situações aparentemente usuais, o que leva a imaginar situações de ressonância sendo as causadoras destas falhas. Nas situações de ressonância de peças, grandes amplitudes podem ser alcançadas na vibração, e, conseqüentemente, grandes deformações e tensões atuantes no material.

Soluções para atenuação e vibração existem nas mais diversas formas, dependendo se o interesse é de mitigar a transmissão da vibração (no caso por isolamento), diretamente eliminar a vibração nas fontes causadoras ou mesmo apenas atenuar a vibração e forma ativa, passiva ou semiativa, com uso de dispositivos acoplados às peças e equipamentos. A solução mais direta para a atenuação é por meio da rigidez, se a excitação é de frequência inferior à de ressonância da peça, ou por amortecimento se esta excitação é maior que a de ressonância.

Investigações na literatura têm demonstrado que o amortecimento em peças de materiais compósitos é, em geral, baixo, devido à sua alta rigidez e baixo peso, entretanto ainda maiores que em materiais metálicos como aço ou alumínio. É possível, dentro dos limites possíveis, fazer o controle desta vibração de forma relativamente barata, por meio do controle do amortecimento.

1.1 Motivação

O estudo do amortecimento em materiais compósitos é ainda incipiente havendo poucos trabalhos que tem investigado de forma experimental esta propriedade, relacionando-a com parâmetros como tipo de material composto (fibra e matriz), número de camadas, processo construtivo, etc. Há relatos na literatura de casos de falha relacionados à fadiga de compostos com forte componente vibracional. Empresas (por exemplo 3M) têm propostos produtos para a mitigação da vibração com o uso de matérias viscoelásticas para a dissipação da energia vibracional em situações onde o amortecimento estrutural do próprio material ou do ambiente (numa situação de vácuo no espaço) este amortecimento não é suficiente para atenuação desta vibração.

1.2 Objetivos

Este trabalho visa estudar o comportamento estrutural quanto ao amortecimento de materiais compósitos, aplicando a eles materiais viscoelásticos, buscando a atenuação da vibração, fazendo um estudo experimental com o uso de técnicas de identificação do amortecimento com uma matriz de testes com diferentes materiais viscoelásticos aplicados ao material composto em diferentes posições e situações, e, como objetivo secundário, pretende-se construir uma bancada de testes experimental que servirá de base a trabalhos futuros, onde a grandeza do amortecimento poderá ser estudada de forma mais sistemática com casos e situações eventualmente não vistas neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Já em 2001 TITA *et al.* (2001) investigaram um procedimento para avaliar o comportamento amortecido de vigas reforçadas com fibras de carbono em vibração por flexão. Razões de amortecimento são avaliadas para amostras experimentais de fibra de vidro

e resina de epóxi $[(\pm 45)_4 (0/90)]_s$. Testes modais com martelo de impacto, acelerômetro e analisador de espectro são utilizados para tanto. Razões de amortecimento $(\zeta(\omega))$ da ordem de 0,04, 0,034 e 0,026 são obtidos para os primeiros três modos de flexão de vigas engastadas-livre (0.4 m x 0,025m) de espessura 1.8 mm e massa 0.028 Kg. Os resultados obtidos reportam que seria possível, a partir da reformulação da sequência de laminação, mudar as características de amortecimento do composto.

Em um trabalho semelhante (para ângulos de fibras), HAUNG E TSAI (2015) avaliam o efeito da adição de nanopartículas de sílica nas propriedades de amortecimento de compostos de fibra/epóxi, concluindo que apesar da redução da rigidez, há um melhoramento das propriedades de amortecimento. Eles relatam que o uso de uma análise micromecânica, junto com a análise modal, apresenta uma boa concordância com os dados experimentais

(avaliados a partir do fator de perda, *loss factor* $\eta(\omega) = 2\zeta(\omega)\sqrt{1 - \zeta^2(\omega)}$), mas, em geral, os valores de razão de amortecimento reportados giram em torno de 0,15% a 0,18%.

Em seu trabalho HAMEED *et al* (2015) afirmam que o amortecimento de materiais compósitos é usualmente função de diversos parâmetros como, por exemplo, a fração volumétrica das fibras, o seu diâmetro, orientação relativa ao eixo de carregamento, matriz constituinte, forma de laminação entre outros. Eles realizam uma investigação do amortecimento em placas de materiais compósitos de fibra de vidro e carbono com matriz de epóxi por meio de testes modais. Investigam diversas condições de contorno (engastado-livre, livre-livre) com diversas orientações (0° , 45° , 90°) em compósitos feitos por processo manual utilizando um acelerômetro, um analisador para FFT de 4 canais e um martelo de impacto modal para obter as FRFs (Funções de Resposta em Frequência) e, posteriormente, o amortecimento. Eles concluem que orientações de 0° da laminação apresentam maior amortecimento que 45° ou 90° . Relatam que a espessura pouco influenciou o amortecimento, diferentemente da condição de contorno de suporte. Os passos, de forma detalhada, de como avaliar o fator de amortecimento em estruturas por ensaios modais, pode ser visto em Carvalho (2002).

Uma primeira tentativa de modelar o comportamento da variação do amortecimento de forma analítica/numérica é feita no trabalho de BERTHOLD *et al* (2008), onde assume-se camadas viscoelásticas entre as camadas dos materiais compósitos. Os resultados são comparados com dados experimentais obtidos com ensaios modais. Comparações entre resultados experimentais das FRFs e as correspondentes por elementos finitos são reportadas e os resultados são muito similares.

ZHENG E LIANG (2020) apresentam uma proposta de modificação do amortecimento e propriedades de isolamento acústico baseada na inclusão de camadas viscoelásticas em compósitos para alterar o amortecimento. No trabalho, descrevem o procedimento por análise modal com acelerômetros e análise no domínio do tempo por meio do decremento logarítmico para a obtenção da razão de amortecimento em materiais compósitos. Com o procedimento, reportam um aumento de mais de 100% no fator de perda (chegando a 1,5% de razão de amortecimento).

Mais recentemente, ZHANG *et al.* (2021) apresentam um estudo da influência da fração volumétrica de fibra de vidro e Epóxi e a orientação da fibra da resistência e amortecimento de laminados de compósitos. Os estudos foram feitos sob vácuo para retirar o efeito do amortecimento aerodinâmico, relatando que o ar tem efeito no amortecimento, principalmente quando este é pequeno. Novamente, ensaios modais com o emprego do decremento logarítmico são usados para quantificar o amortecimento nestes materiais, chegando a valores no ar de razões de amortecimento ζ de 2,42% (para uma certa orientação de fibras e número de camadas) até 1,15% no vácuo e mesmas dimensões.

Diferentemente dos trabalhos revisados, este trabalho propõe o controle e modificação do amortecimento por meio da inclusão externa de lâminas de materiais viscoelásticos ao laminado de material compósito fazendo, portanto, uma análise diferente das encontradas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Razão de Amortecimento pelo Decremento Logarítmico

Para o cálculo da razão de amortecimento em materiais compósitos, assumindo que este seja oriundo na sua maior parte por amortecimento viscoso (forças dissipativas proporcionais à velocidade de vibração), pode-se utilizar a formulação por decremento logarítmico dos sinais de vibração livre com certas condições de contorno. Em ZHENG (2020) é dito que é possível fazer-se um ajuste por mínimos quadrados para a lei de decaimento das vibrações livres e obter uma boa estimativa desta propriedade de amortecimento. O sistema pode ser caracterizado pelo seu período (ou frequência) e razão de amortecimento. A relação entre a frequência natural não amortecida e amortecida, nestas condições, vem dada por:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}, \quad (1)$$

onde ω_d é a frequência amortecida (rad/s) e ω_n a frequência natural não-amortecida e ζ a chamada razão de amortecimento que, em geral, para sistemas de materiais laminados compósitos, está entre $0 < \zeta < 1$, representando uma condição subamortecida. Assim, a resposta do sistema pode ser dada por:

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_d t} X \text{sen}(\omega_d t + \varphi) \quad (2)$$

onde $x(t)$ é a resposta do sistema no tempo, X é sua amplitude inicial, t são os instantes de tempo e φ um ângulo de fase. Para condições iniciais x_0 , \dot{x}_0 ,

$$X = \sqrt{x_0^2 + [(\dot{x}_0 + \zeta\omega_n x_0)/\omega_d]^2}$$

e $\varphi = \arctan[\omega_d x_0 / (\dot{x}_0 + \zeta\omega_n x_0)]$. O envelope da equação (2) pode ser representado como:

$$z(t) = m e^{-n(t-l)} \quad (3)$$

com m , n e l constantes a serem determinadas, por exemplo, por meio de um ajuste de função com o envelope do sinal com decaimento, obtido experimentalmente (Figura 1). Portanto, logaritimizando a equação (3), fica-se com:

$$\ln [z(t)] = \ln (m) - nt + nl \quad (4)$$

Definindo $f = \ln[z(t)]$ e $h = \ln \ln (m) + nl$, a equação fica linearizada ($f = -nt + h$) e poderá ser utilizada para ser ajustada por mínimos quadrados à uma série de k dados do envelope, obtidos experimentalmente, e, posteriormente, obtido a razão de amortecimento (minimizando a função ϕ):

$$\phi = \sum_{i=1}^k [f_i - (nt_i + h)]^2 \quad (5)$$

Aplicando a condição necessária para um ótimo, $\partial\phi/\partial n = 0$ e $\partial\phi/\partial h = 0$, e resolvendo o sistema, chega-se a:

$$n = \left[\sum_{i=1}^k t_i f_i - \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^k t_i \sum_{i=1}^k f_i \right) \right] / \left[\frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^k t_i \right)^2 - \sum_{i=1}^k t_i^2 \right] \quad (6)$$

$$h = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k f_i + \frac{n}{k} \sum_{i=1}^k t_i \quad (7)$$

Se tomarmos a razão entre duas medições de deslocamentos separadas de um período amortecido τ_d , isto resulta em:

$$\frac{x(t_1)}{x(t_2)} = \frac{e^{-\zeta\omega_d t_1} X \text{sen}(\omega_d t + \varphi)}{e^{-\zeta\omega_d t_2} X \text{sen}(\omega_d t + \varphi)} = e^{\zeta\omega_d \tau_d} \quad (8)$$

E o decremento logarítmico, calculado para um conjunto de n medidas tomadas separadas $n\tau_d$, fica $\underline{\delta} = \frac{1}{n} \ln \ln \left(\frac{x(t_1)}{x(t_n)} \right) = \zeta\omega_d \tau_d = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$ e que resolvido para ζ , resulta em:

$$\zeta = \frac{\underline{\delta}}{\sqrt{2\pi^2 + \underline{\delta}^2}} \quad (9)$$

A relação entre n , ζ e ω_n pode ser colocada como $n = \zeta\omega_n$. Define-se o chamado fator de perda (loss factor) η como sendo $\eta = 2\zeta$. A Figura 1 indica uma curva genérica de vibração livre, indicando os principais parâmetros necessários para o cálculo da razão de amortecimento (ou fator de perda) no método do decremento logarítmico.

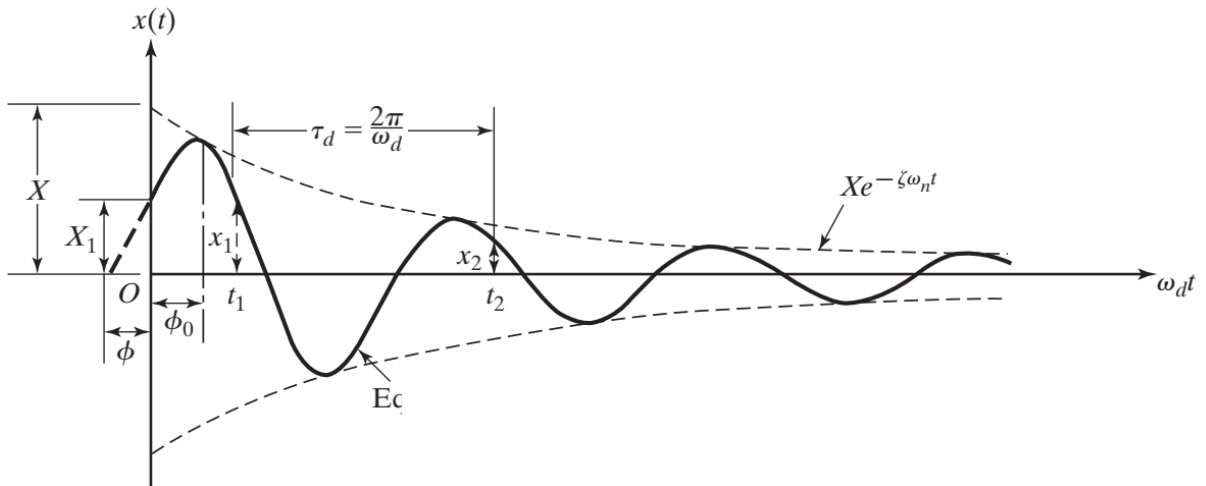


Figura 1 – Curva de vibração livre com amortecimento viscoso para definição do decremento logarítmico.

4 METODOLOGIA

O modo em que as análises experimentais foram desenvolvidas, de forma a obter mais informações sobre o tema, divide-se essencialmente em três etapas, sendo a primeira a definição de uma matriz de testes, levando em consideração a quantidade de amostras e a disponibilidade de diferentes materiais viscoelásticos para tal ensaio. Na segunda etapa, se

deu andamento à confecção da bancada experimental visando atender a matriz supracitada. Essa, por sua vez, permitiu que os ensaios fossem realizados de duas diferentes formas, uma utilizando um martelo instrumentado para excitar a amostra, permitindo não só obter os valores de aceleração da mesma, como também informações sobre a força excitadora. Tal método veio a apresentar dificuldades no tratamento dos dados pós teste. Na outra forma, foi adotado para os testes um método diferente de excitação da amostra, sendo este um deslocamento inicial prescrito. Por fim, na última etapa, para a análise dos dados foi inicialmente utilizado uma função de resposta em frequência que, como citado anteriormente, não obteve resultados satisfatórios para a reprodutibilidade, visto que requeria uma série de parâmetros para seu uso e a modificação destes parâmetros acarretava alteração dos resultados de amortecimento avaliados. Sendo assim, foi utilizado a transformada rápida de Fourier (FFT-*Fast Fourier Transform*), sucedida de um filtro passa-faixa em torno da frequência de interesse e, posteriormente, o cálculo de amortecimento através do decremento logarítmico pela minimização da curva, como exposto anteriormente, utilizando apenas os picos de aceleração medidos (envoltória).

4.1 Amostras para teste

As amostras de teste consistem em barras de material compósito, nas dimensões de 50x390x2 mm, massa de 61 g aferida em balança calibrada, e cujas propriedades estão indicadas no Boletim Técnico do fabricante constante no Apêndice A.1 e Apêndice A.2.

4.2 Materiais viscoelásticos empregados

Para os ensaios realizados, foram utilizados 5 diferentes materiais viscoelásticos em formato de fita adesiva, de largura 50 mm, similar à largura das barras de teste. Uma breve descrição, assim como a massa de cada um dos materiais obtidas através de pesagem em balança calibrada, podem ser observadas na Tabela 1. A Figura 2 abaixo apresenta uma foto destes materiais colados às placas de materiais compósitos.

Tabela 1 – Breve descrição e massa dos materiais viscoelásticos utilizados em cada uma das amostras.

Nº da amostra	Material	Massa (g/m)
1	Fita de demarcação/isolante	9,62
2	Manta asfáltica autoadesiva	67,7
3	Fita adesiva com reforço de fibra de vidro transversal e longitudinal	11,96
4	Fita adesiva com reforço de fibra de vidro longitudinal	7,31
5	Fita alumínio autoadesiva	5,53



Figura 2 – Amostras de teste após realizadas as medições, numeradas de acordo com a ordem citada na Tabela 1.

4.3 Matriz de testes e projeto de experimentos

Para a elaboração da matriz de teste foram considerados submeter cada uma das vigas a ensaios simples de vibração livre amortecida, aplicando cada um dos tratamentos com material viscoelástico disponível.

Para cada condição de ensaio, deveriam ser feitas cinco medições válidas. Em seguimento, foram realizados ensaios com uma amostra de controle, sem a adesão de nenhum material, e para cada um dos cinco materiais, foram ensaiadas três diferentes condições de adesão nas amostras.

A primeira das condições consiste em colar o material viscoelástico nas duas superfícies da amostra, a segunda apenas em uma das faces, mas ainda cobrindo sua totalidade. A terceira condição, por sua vez, consiste em manter em apenas uma face o material aderido desde o engaste até a metade do comprimento da amostra. Em conformidade com isto, a matriz final de testes pode ser observada através da Tabela 2.

Tabela 2 – Matriz de testes executados durante o experimento.

Matriz de testes (Nº de medições)		Configuração do material viscoelástico		
		Cobertura 100% 2 faces	Cobertura 100% 1 face	Cobertura 50% 1 face
Material viscoelástico	0 - Controle	5	Não Aplica	Não Aplica
	1 - Fita de demarcação/isolante	5	5	5
	2 - Manta asfáltica auto adesiva	5	5	5
	3 - Fita adesiva com reforço de fibra de vidro transversal e longitudinal	5	5	5
	4 - Fita adesiva com reforço de fibra de vidro longitudinal	5	5	5
	5 - Fita alumínio auto adesiva	5	5	5

Uma representação de como é feita a adesão do material viscoelástico na totalidade de uma face e em meia face pode ser observada na Figura 3.

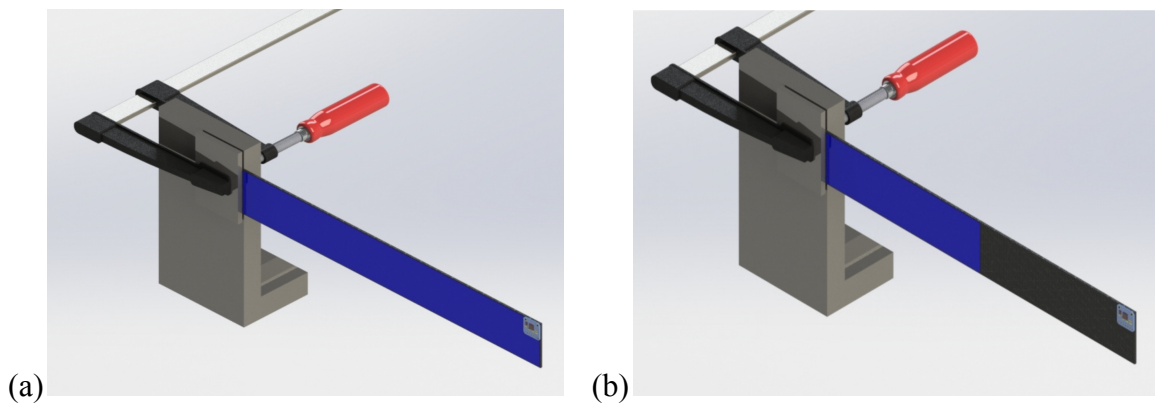


Figura 3 – Disposição do material viscoelástico na amostra nas condições de (a) cobertura de face inteira e (b) meia face, respectivamente.

4.4 Bancada experimental

Para realização das medições, foram confeccionadas algumas peças em aço carbono, nas quais as amostras foram fixadas com o auxílio de grampos tipo sargento, restringindo sua rotação e translação com relação a bancada. A bancada, assim como a amostra de número 3 devidamente fixada, podem ser observadas na Figura 4.

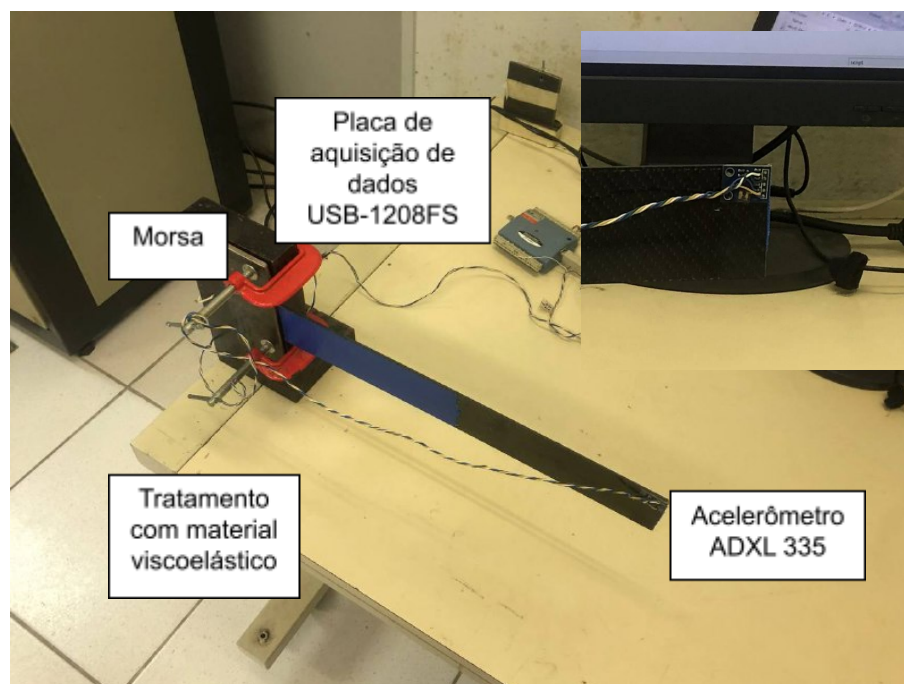


Figura 4 – Amostra 3, na condição de tratamento em meia face, fixada à bancada de testes.

As amostras foram fixadas na bancada na condição engastada-livre, usando 40 mm de uma das extremidades para fixação e obtendo-se um comprimento útil de 350 mm. Um acelerômetro foi fixado na extremidade da amostra a fim de medir os valores de aceleração neste ponto. A forma de fixação foi com cera de abelha, visto que os níveis de aceleração eram relativamente baixos a ponto de a cera ser suficiente para manter o acelerômetro fixo na ponta da amostra.

Inicialmente, foram realizados testes utilizando um martelo de impacto com ponteira em material emborrachado, modelo Endevco ISOTRON 4416-1 (Figura A.3 dos Apêndices contém o *DataSheet*), com ganho de 10X e sensibilidade 1,14 mV/N, porém, houveram problemas com a análise e tratamento dos dados posteriores ao teste, em parte pelo fato de outros modos de vibração, além do primeiro, estarem sendo excitados, o que também pode ter sido causado pela falta de rigidez da mesa na qual a amostra foi fixada, e, em parte pela dificuldade de manter uma cadência constante de batidas na amostra durante as medições.

Após tal verificação, foram realizados ensaios utilizando-se de um batente a fim de excitar a amostra apenas aplicando um deslocamento prescrito (igual para todas as amostras) na extremidade da mesma. A realização dos ensaios de tal forma, resultou em apenas o primeiro modo de frequência sendo significativamente excitado, bem como em uma maior coerência nos resultados após o tratamento dos dados.

As acelerações foram medidas com um acelerômetro conectado à extremidade da viga, modelo ADXL 335 da empresa *Analog Devices* (Figura A.4 dos Apêndices contém o respectivo *DataSheet*). A sensibilidade deste é de 970 mV/g, uma aceleração máxima de medição de $\pm 3,0$ g, com uma faixa de frequências de 0 a 550 Hz. Os sinais de aceleração foram adquiridos com uma placa de aquisição de dados da empresa *Measurement Computing* modelo USB-1208-FS de 12 bits (Figura A.5 dos Apêndices contém o respectivo *DataSheet*). Os dados foram adquiridos com uma taxa de amostragem de $f_s = 1000$ Hz.

4.5 Tratamento de dados

Os dados obtidos através dos experimentos foram armazenados e tratados através do *software* Matlab (2012). Inicialmente foram aplicados alguns tratamentos de forma a obter funções de resposta em frequência, levando em consideração o *feedback* obtido através do martelo instrumentado, porém foram observados dois efeitos indesejados fazendo as medições de tal forma. O primeiro é a excitação do segundo e terceiro modos de vibração sendo mais significativa em relação ao primeiro modo. O segundo, por sua vez, é a dificuldade de encontrar uma razão de amortecimento estável durante toda a duração da medição, já que é necessário ajustar uma série de parâmetros para a obtenção deste valor a partir da FRF, tornando o procedimento não repetitivo e bastante dependente dos parâmetros utilizados em cada avaliação.

Para o seguimento dos experimentos, foi adotado um novo método que consiste em aplicar um deslocamento prescrito na extremidade da viga como forma de excitação. A análise do gráfico das acelerações permite identificar uma onda com formato senoidal, sem indícios de ruídos ou sobreposição de frequências. Um exemplo de dado adquirido de sinal de aceleração na ponta da amostra ao longo do tempo pode ser observado na Figura 5.

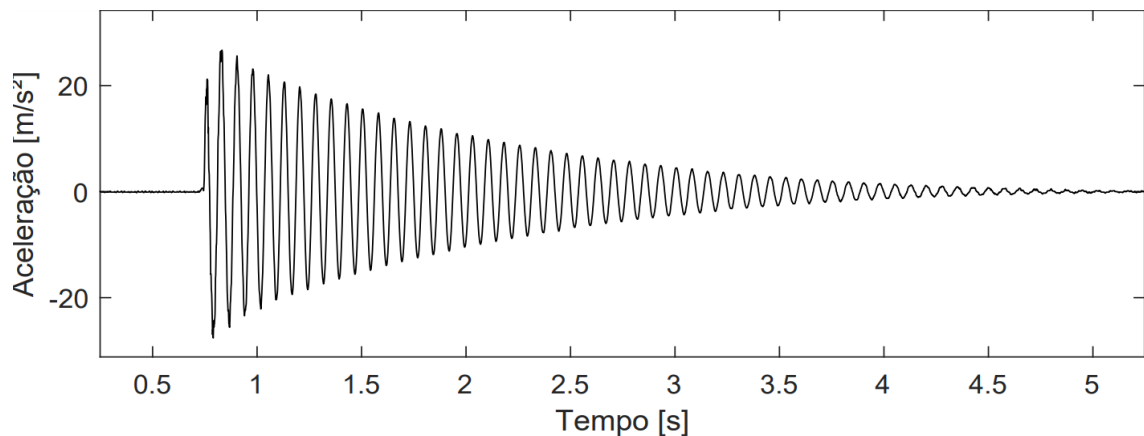


Figura 5 – Medição #48, onda senoidal com amortecimento.

Após tal aquisição, foi realizada uma Transformada Rápida de Fourier FFT para tal conjunto de valores, visando buscar as frequências de oscilação relevantes dentro da faixa em que o acelerômetro é capaz de ler, podendo ser observada na Figura 6.

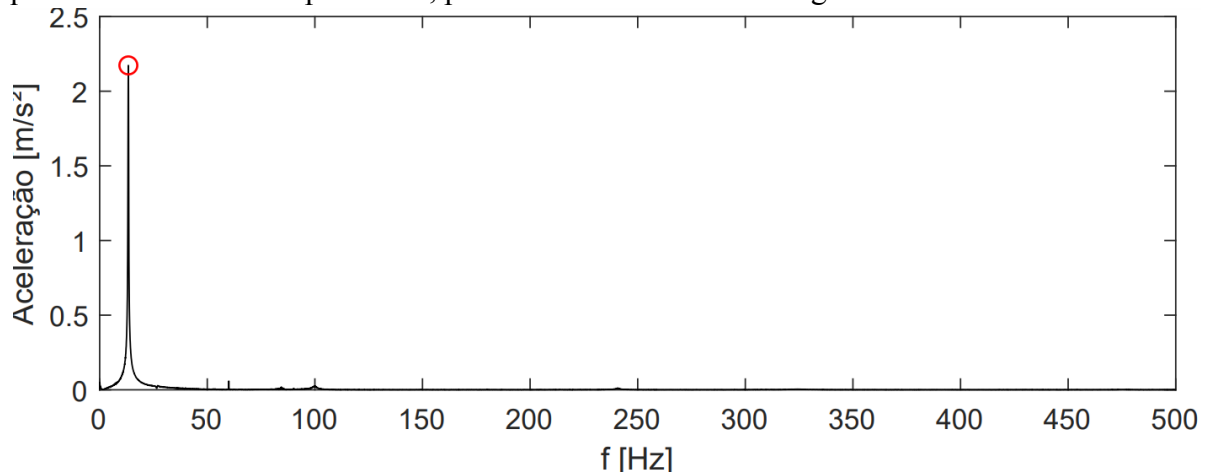


Figura 6 – FFT da medição #48, apenas um modo de vibração com valores de aceleração significantes, o primeiro modo. Valor medido: 13,3190 Hz.

Notadamente, o valor é bastante claro e sem ruídos, contendo apenas a primeira frequência de vibração referente ao primeiro modo de vibração em flexão do sistema medido.

Obtido o valor de frequência do primeiro modo, foi aplicado um filtro nos valores medidos a fim de obter apenas as acelerações em frequência específica, e, utilizando as coordenadas dos picos superiores da onda senoidal (envoltória) e fazendo-se o ajuste por mínimos quadrados, foi encontrado o valor de ζ . A onda formada pelos dados filtrados, assim como a curva exponencial aproximada, podem ser observadas na da Figura 7.

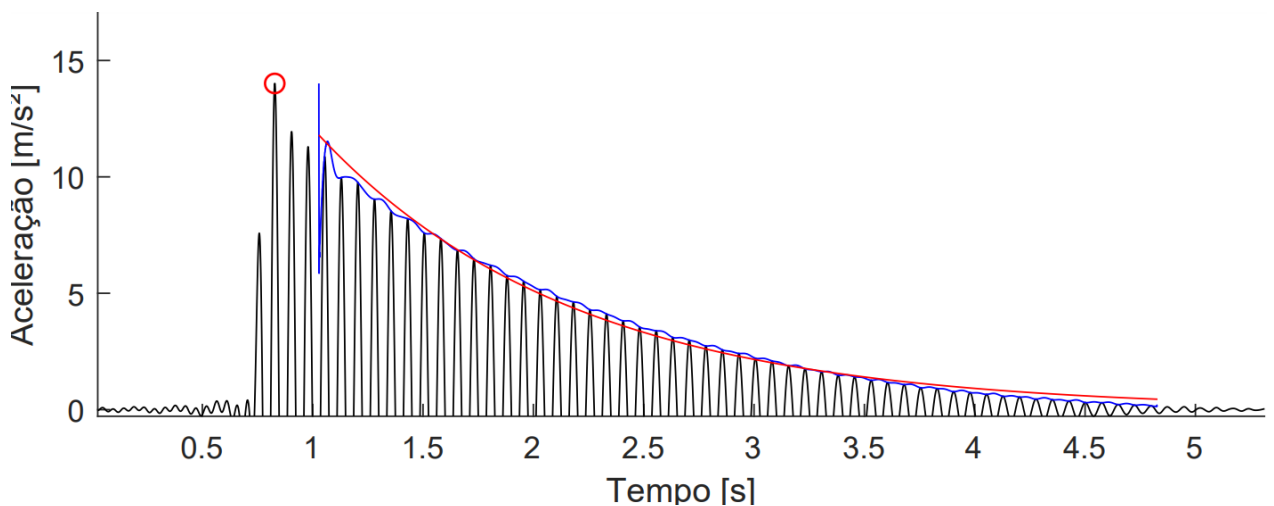


Figura 7 – Medição #48, gráfico dos valores filtrados e curva exponencial aproximada (em vermelho).

Repetindo este processo para todas as medições presentes na matriz de testes, obtiveram-se os valores de frequência de primeiro modo e razão de amortecimento para todas as configurações desejadas de tratamento com material viscoelástico.

5 RESULTADOS

As medições válidas realizadas em conformidade com a metodologia descrita podem ser observadas em sua totalidade na Tabela A.1, presente no anexo abaixo.

Um resumo dos dados obtendo valores médios para cada condição de teste, de todas as medições válidas realizadas pelo método do deslocamento prescrito, podem ser observados na Tabela 3.

Combinando os dados de massa das amostras e materiais viscoelásticos com os valores representados na Tabela 3, é possível efetuar uma análise de quanta massa está sendo adicionada ao sistema com o tratamento e verificar, para cada condição de teste, qual é a razão entre o aumento de massa dado ao sistema e o aumento da razão de amortecimento para o primeiro modo de vibração. Os dados para esta análise estão contidos na Tabela 4.

Tabela 3 – Valores de Frequência e Razão de amortecimento médios para cada condição de teste, acompanhados de seus respectivos desvios-padrão.

Amostra	Condição	Freq. nat. amort. Média μ_f (Hz)	Desv. Pad σ_f	Razão de Amortecimento μ_ζ Média	Desv. Pad. σ_ζ
Controle	–	14,5513	0,0000	0,0080	0,0003
1	2 Faces	13,4845	0,0000	0,0082	0,0002
1	1 Face	13,6317	0,0190	0,0071	0,0004
1	½ Face	13,9107	0,0147	0,0101	0,0007
2	2 Faces	11,0308	0,0183	0,0120	0,0001
2	1 Face	12,1579	0,0155	0,0136	0,0007
2	½ Face	14,2248	0,0155	0,0161	0,0007
3	2 Faces	12,9511	0,0000	0,0113	0,0010
3	1 Face	13,3191	0,0000	0,0103	0,0001
3	½ Face	13,7255	0,0143	0,0100	0,0009
4	2 Faces	14,3251	0,0277	0,0150	0,0007
4	1 Face	14,3923	0,0143	0,0132	0,0007
4	½ Face	14,6590	0,0143	0,0136	0,0004
5	2 Faces	13,4247	0,0155	0,0146	0,0006
5	1 Face	13,3922	0,0143	0,0141	0,0009
5	½ Face	13,2781	0,0143	0,0214	0,0005

Tabela 4 – Valores de massa, aumento de massa, aumento de Razão de Amortecimento e coeficiente.

Amostra	Condição	Massa total da amostra (g)	Massa acrescentada (%)	Aumento da Razão de Amortecimento (%)	Coef.
Controle	–	61,00	–	–	–
1	2 Faces	67,73	11,04	2,26	0,20
1	1 Face	64,37	5,52	-10,69	-1,94
1	1/2 Face	62,68	2,76	26,92	9,75
2	2 Faces	108,39	77,69	49,96	0,64
2	1 Face	84,70	38,84	70,30	1,81
2	1/2 Face	72,85	19,42	101,44	5,22
3	2 Faces	69,37	13,72	42,11	3,07
3	1 Face	65,19	6,86	29,03	4,23
3	1/2 Face	63,09	3,43	24,83	7,24
4	2 Faces	66,12	8,39	88,13	10,51
4	1 Face	63,56	4,19	64,81	15,45
4	1/2 Face	62,28	2,10	69,98	33,37
5	2 Faces	64,87	6,35	82,86	13,06
5	1 Face	62,94	3,17	76,77	24,19
5	1/2 Face	61,97	1,59	168,09	105,95

Uma outra análise que pode ser feita a partir dos dados obtidos, e que traz uma melhor visão sobre o comportamento das amostras conforme altera-se os tratamentos superficiais, pode ser vista nos gráficos presentes nas Figuras 8 e 9.

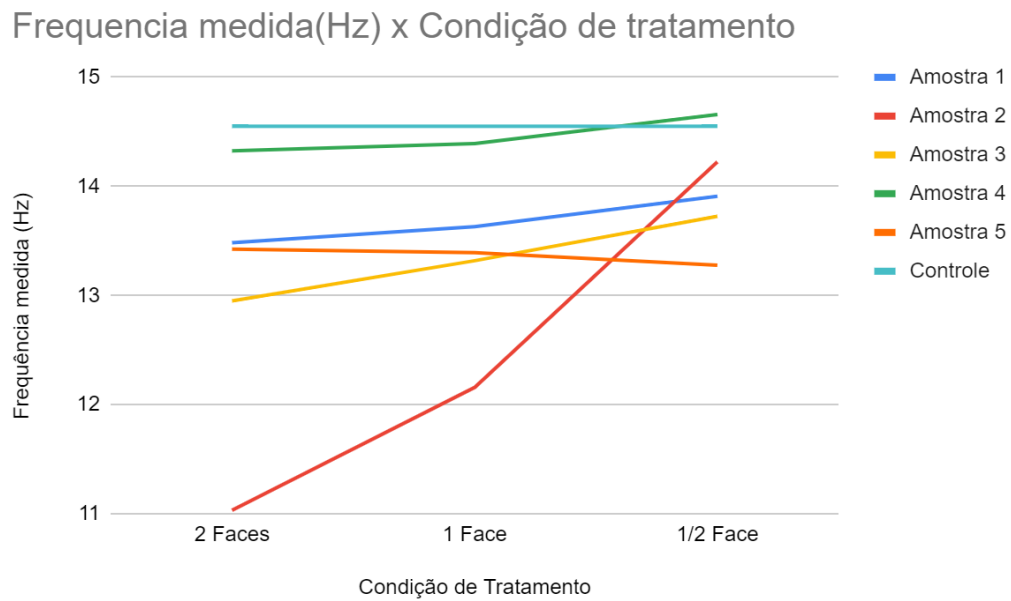


Figura 8 – Gráficos sobrepostos de Frequência x Condição de tratamento.

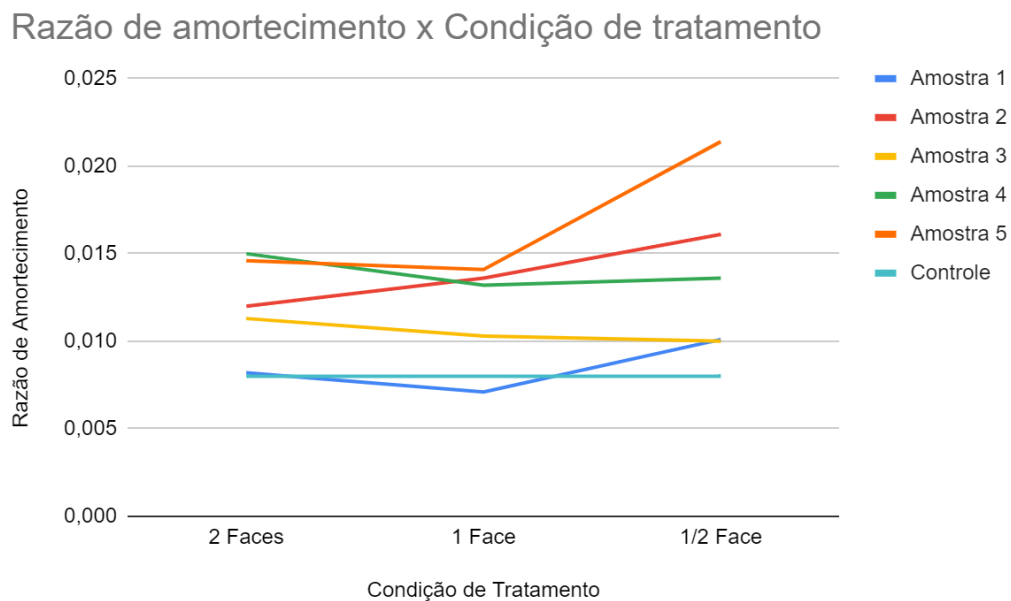


Figura 9 – Gráficos sobrepostos de Razão de amortecimento x Condição de tratamento.

Através da Figura 8 é possível observar que de uma maneira geral, a frequência natural tem uma tendência a reduzir conforme aumenta-se a severidade do tratamento, sendo a amostra 5 a exceção neste caso. Outro detalhe que chama a atenção neste gráfico, é a grande alteração de frequência para a amostra 2, trazendo uma redução de aproximadamente 25% na frequência com relação à amostra Controle, enquanto o segundo maior efeito foi causado pela amostra 3, com uma redução de aproximadamente 11%.

Analisando a figura 9, por sua vez, observa-se que para as amostras 3 e 4, ambas compostas por materiais fibrosos, a razão de amortecimento das mesmas tende a aproximar-se da razão de amortecimento da amostra Controle com a redução da severidade do tratamento,

enquanto as demais amostras apresentam um comportamento reverso para o caso com tratamento em meia face.

6 CONCLUSÕES

Por meio da análise dos valores constantes na Tabela 3, é possível observar que tanto no caso das frequências, quanto no caso das razões de amortecimento calculadas, os desvios padrão das medições apresentam valores de pelo menos uma ordem de grandeza menor em relação aos próprios valores medidos, sendo isto um indicativo da boa repetibilidade do experimento.

A amostra 1 (Fita de demarcação/isolante) apresentou a menor alteração na razão de amortecimento em relação às outras amostras e, ainda assim, não foi a que apresentou a menor alteração de massa.

A amostra 2 (Manta asfáltica auto adesiva), por sua vez, apresentou alterações mais significativas na razão de amortecimento, porém ocasionou um acréscimo significativo de massa ao sistema. Tal acréscimo de massa, juntamente às alterações geométricas causadas pela adesão do material viscoelástico, justificam a grande alteração na frequência natural quando comparada à da amostra Controle.

As amostras 3 (Fita adesiva com reforço de fibra de vidro transversal e longitudinal) e 4 (Fita adesiva com reforço de fibra de vidro longitudinal) apresentaram comportamentos similares tanto em relação à razão de amortecimento, quanto à frequência natural, sendo a amostra 4, dentre estas duas, a que conseguiu maior aumento na razão de amortecimento. O comportamento da razão de amortecimento, sendo diferente das demais amostras e reduzindo para o caso de tratamento em meia face, pode ser justificado pela similaridade do material viscoelástico ao material compósito, ambos contendo fibras como elemento estrutural em sua composição.

Em destaque, observa-se a amostra 5 (Fita alumínio auto adesiva), cujo material empregado foi a Fita de Alumínio auto-adesiva. Esta não só obteve os maiores valores de razão de amortecimento, como também foi o caso em que a menor quantidade de massa foi adicionada ao sistema, sendo, portanto, claro justificar a mudança de amortecimento ocasionada apenas pelo tratamento do material viscoelástico. Diferentemente das outras amostras, a mesma foi a que apresentou um comportamento decrescente para a progressão das frequências naturais com os tratamentos superficiais. Uma possível justificativa para tal é que a alteração na frequência causada pela alteração na razão de amortecimento, conforme a Equação 1, é mais significativa em relação a alteração de frequência causada pela diferença de geometria e massa quando comparada com a amostra Controle.

Por fim, ainda não foram encontradas as causas para o aumento da razão de amortecimento com o tratamento de meia face nas amostras 1, 2 e 5.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a elaboração de novos estudos acerca do efeito observado e acima descrito, referente ao aumento da razão de amortecimento para o tratamento de meia face. Podem ser feitas algumas simulações em Elementos Finitos, a fim de verificar a existência de linhas nodais de algum modo significativo na região de transição do tratamento, assim como uma análise de otimização da região a ser aderida o material viscoelástico, para uma quantidade limitada do mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERTHOLD, J.-M., ASSARAR, M. SEFRANI. Y. EL-MAHI, A. “**Damping analysis of composite materials and structures**”. *Composite Structures*, (85): 189-204, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.10.024>

CARVALHO, F. W. L. “**Procedimento experimental para avaliação do fator de amortecimento em estruturas**”, Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

HAMEED, R., NANJUNDIRADHAYA, N. V., SHARMA, R. “**Estimation of modal damping in laminated composites through modal testing**”. *AIJRSTEM American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics*, 15 (335), p.2328-3491. 2015.

HUANG, C.-Y, TSAI, J.-L. “**Characterizing vibration damping response of composite laminates containing silica nanoparticles and rubber particles**”. *Journal of Composite Materials*, 49(5): 545-557, 2015. <https://doi.org/10.1177/0021998314521257>

MATLAB. **Matrix Laboratory, 2012**. Version 6.0 (R2012b), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.

TITA, V., CARVALHO, J., LIRANI, J. “**A procedure to estimate the dynamic damped behavior of fiber reinforced composite beams submitted to flexural vibrations**”, *Materials Research*, 4(4):315-321, 2001. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392001000400015>

ZHANG, B. LI, Z., WU, H., NIE, J. “**Research on damping performance and strength of the composite laminate**”, *Scientific Reports, Nature Portfolio*, 11:18281-18290, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97933-w>

ZHENG, C., LIANG, S. “**Fabrication and investigation on damping performance of a novel co-curing sandwich composites**”, *Polymer Composites*, 41:5116-5125, 2020. <https://doi.org/10.1002/pc.25779>

ANEXO

Tabela A.1 – Medições válidas de Frequência e Razão de amortecimento realizadas.

Med	Freq(Hz):	Zeta(-):	Med	Freq(Hz):	Zeta(-):	Med	Freq(Hz):	Zeta(-):	
1	14.55130557	0.00774273	31	12.15098553	0.01431542	61	14.38588605	0.0130111	
2	14.55130557	0.00808384	32	12.15098553	0.01355245	62	14.38588605	0.0122422	
3	14.55130557	0.00803189	33	12.15098553	0.01405263	63	14.41795446	0.01358445	
4	14.55130557	0.00833472	34	12.15098553	0.01360566	64	14.38588605	0.01400472	
5	14.55130557	0.00772119	35	12.18559268	0.01244746	65	14.38588605	0.01294126	
6	13.48449666	0.00831028	36	14.21792779	0.01603535	66	14.65258828	0.01376678	
7	13.48449666	0.00847884	37	14.21792779	0.01684341	67	14.65258828	0.0134545	
8	13.48449666	0.00794993	38	14.21792779	0.01532733	68	14.68465669	0.01396974	
9	13.48449666	0.00811775	39	14.21792779	0.01540359	69	14.65258828	0.0129854	
10	13.48449666	0.00795952	40	14.25253494	0.01679484	70	14.65258828	0.0136697	
11	13.65245493	0.006784	41	12.95109221	0.01270367	71	13.41782111	0.01429528	
12	13.65245493	0.00661806	42	12.95109221	0.01143599	72	13.41782111	0.01493209	
13	13.61784778	0.00733246	43	12.95109221	0.01036839	73	13.45242826	0.01537801	
14	13.61784778	0.00744988	44	12.95109221	0.01029312	74	13.41782111	0.01369406	
15	13.61784778	0.00746485	45	12.95109221	0.01192179	75	13.41782111	0.01468819	
16	13.91661841	0.00917408	46	13.31907715	0.01040195	76	13.3857527	0.01246579	
17	13.91661841	0.0104285	47	13.31907715	0.01040643	77	13.3857527	0.01440236	
18	13.91915716	0.00955116	48	13.31907715	0.01028918	78	13.3857527	0.01476277	
19	13.91661841	0.01079374	49	13.31907715	0.01018014	79	13.3857527	0.01468548	
20	13.88455	0.01071264	50	13.31907715	0.01022271	80	13.41782111	0.01423968	
21	13.8204132	0.01444746	51	13.71913049	0.01071348	81	13.28446999	0.0208581	
22	13.8524816	0.01435585	52	13.71913049	0.00938009	82	13.28446999	0.02147135	
23	13.8524816	0.01526494	53	13.75119889	0.01103788	83	13.28446999	0.0218083	
24	13.8204132	0.01503117	54	13.71913049	0.00954396	84	13.25240159	0.02096186	
25	13.8524816	0.01383883	55	13.71913049	0.00914952	85	13.28446999	0.02190789	
26	11.01750106	0.01192398	56	14.28460334	0.01487419	06 a 25 - Amostra 1		01 a 05 - Amostra Controle	
27	11.01750106	0.01183415	57	14.3192105	0.01599695	26 a 40 - Amostra 2			
28	11.01750106	0.01214789	58	14.3192105	0.01450618	41 a 55 - Amostra 3			
29	11.04956947	0.01190468	59	14.3512789	0.01418335	56 a 70 - Amostra 4			
30	11.05210822	0.01204595	60	14.3512789	0.01552939	71 a 85 - Amostra 5			

APÊNDICE



Boletim Técnico

Material: Compósito de fibras sintéticas (SFC).

Composição: Resina epóxi e fibra de carbono.

A Tabela abaixo mostra algumas características físicas do material SFC.

Propriedades	Norma	Especificações	Unidade
Resistência ao Impacto (Izod)	ASTM D-256	1200	J/m
Resistência a Compressão	ASTM D-695	200	MPa
Resistência a Flexão	ASTM D-790	700	MPa
Módulo de Flexão	ASTM D-790	40	GPa
Resistência a Tração	ASTM D-638	350	MPa
Módulo de Tração	ASTM D-638	40	GPa
Absorção de água	ASTM D-570	0,10	%
Peso específico	ASTM D-792	1.50	g/cm ³
Dureza Barcol	ASTM D-2583	60	Barcol
Rigidez Dielétrica	ASTM D-635	5	Kv/mm
TG (Temperatura de Transição Vítrea)	-	120	°C

Os valores acima indicados são valores médios e foram obtidos em laboratório, servindo como referência para o desenvolvimento de novos produtos.

Figura A.1 – Propriedades mecânicas e térmicas das amostras de materiais compósitos.

Dimensões: 390mm x 50 mm x 2 mm

Trama: tecido Twill (Sarja) 2x2 e fio 3k com orientação cross-ply 0o-90 o, 10 camadas

Fornecedor: CarbonStore

Densidade: 200g /m²

Figura A.2 – Propriedades Elásticas e geométricas dos laminados empregados nos ensaios.

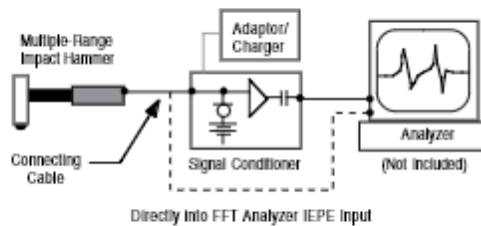
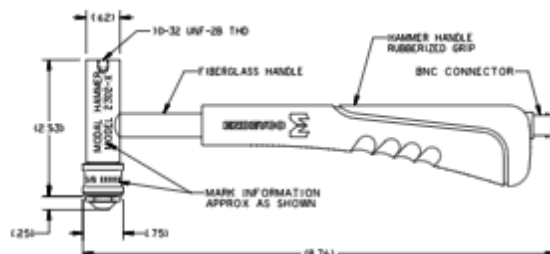


Endevco

Model 2302 Modal hammer

Features

- Model 2302 -5, -10, -50, -100
- Four ranges
- 3 replaceable tips
- Low impedance (Isotron[®]) output
- Acceleration compensated
- Ergonomically designed grip



Description

Scaled modal models require a precise force measurement. This can be achieved by electrodynamic and servohydraulic exciters controlled by a signal generator via a power amplifier. A more convenient and economical excitation method is a hammer fitted with a high-quality piezoelectric force transducer. In applications where a high crest factor and a limited ability to shape the input force spectrum is of no concern, impact hammer testing is an ideal source of excitation. Impact hammers are highly portable for field work and provide no unwanted mass loading to the structure under test.

The modal hammer excites the structure with a constant force over a frequency range of interest. Three interchangeable tips are provided which determine the width of the input pulse and thus the bandwidth. Typical force spectra produced with different tips are shown at the bottom.

For larger structures, an optional head extender is available to increase the head's mass. The hammer structure is acceleration compensated to avoid glitches in the spectrum due to hammer structure resonances. The ergonomically designed handle grip helps the user optimize control and reduce the possibility of "double hits".

The hammer features an Isotron impedance converter providing an IEPE output which is compatible with most FFT analyzers and data acquisition systems.

Endevco's 4416B single channel signal conditioner or the model 100 three channel conditioner are recommended for use with the 2302. To excite larger structures, see Endevco model 2303, 2304 and 2305 wedge hammers.

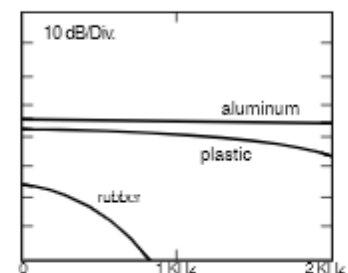


Figura A.3 – Especificações do Martelo de Impacto utilizado nos experimentos.

ADXL335

SPECIFICATIONS

T_a = 25°C, V_s = 3 V, C_a = C_z = C_y = 0.1 µF, acceleration = 0 g unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
SENSOR INPUT					
Measurement Range	Each axis	±3	±3.6		g
Nonlinearity	% of full scale		±0.3		%
Package Alignment Error			±1		Degrees
Interaxis Alignment Error			±0.1		Degrees
Cross-Axis Sensitivity ¹			±1		%
SENSITIVITY (RATOMETRIC)²	Each axis	270	300	330	mV/g
Sensitivity at X _{out} , Y _{out} , Z _{out}	V _s = 3 V		±0.01		%/C
Sensitivity Change Due to Temperature ³	V _s = 3 V				
ZERO g BIAS LEVEL (RATOMETRIC)					
0 g Voltage at X _{out} , Y _{out}	V _s = 3 V	1.35	1.5	1.65	V
0 g Voltage at Z _{out}	V _s = 3 V	1.2	1.5	1.8	V
0 g Offset vs. Temperature			±1		mg/°C
NOISE PERFORMANCE					
Noise Density X _{out} , Y _{out}		150	1600		µg/√Hz rms
Noise Density Z _{out}		300	550		µg/√Hz rms
FREQUENCY RESPONSE⁴					
Bandwidth X _{out} , Y _{out} ⁵	No external filter		1600		Hz
Bandwidth Z _{out} ⁶	No external filter		550		Hz
Rise Tolerance			32 ± 15%		KHz
Sensor Resonant Frequency			5.5		KHz
SELF-TEST⁷					
Logic Input Low			+0.6		V
Logic Input High			+2.4		V
ST Actuation Current			+60		µA
Output Change at X _{out}	Self-Test 0 to Self-Test 1	-150	-325	-600	mV
Output Change at Y _{out}	Self-Test 0 to Self-Test 1	+150	+325	+600	mV
Output Change at Z _{out}	Self-Test 0 to Self-Test 1	+150	+350	+1000	mV
OUTPUT AMPLIFIER					
Output Swing Low	No load		0.1		V
Output Swing High	No load		2.8		V
POWER SUPPLY					
Operating Voltage Range	V _s = 3 V	1.8		3.6	V
Supply Current	No external filter		350		µA
Turn-On Time ⁸			1		ms
TEMPERATURE					
Operating Temperature Range		-40		+85	°C

¹ Defined as coupling between any two axes.
² Sensitivity is essentially constant to 10% over the operating temperature range.
³ Sensitivity is essentially constant to 10% over the operating temperature range.
⁴ Actual frequency response controlled by user-supplied external filter capacitors (C_a, C_y, C_z).
⁵ Bandwidth with external capacitors = $\sqrt{2} \times \pi \times 33 \text{ KHz} \times C$. For C_a, C_y = 0.003 µF, bandwidth = 1.6 KHz. For C_z, C_a, C_y = 0.01 µF, bandwidth = 500 Hz. For C_a, C_y, C_z = 10 µF, bandwidth = 0.5 Hz.
⁶ Bandwidth = 0.5 Hz.
⁷ Turn-on time is dependent on C_a, C_y, C_z and is approximately 160 × C or C + 1 ms, where C_a, C_y, C_z are in microfarads (µF).
⁸ Turn-on time is dependent on C_a, C_y, C_z and is approximately 160 × C or C + 1 ms, where C_a, C_y, C_z are in microfarads (µF).

Figura A.4 – Características técnicas dos acelerômetros ADXL 335 empregados.

USB-1208FS
Specifications

Specifications

All specifications are subject to change without notice. Typical for 25 °C unless otherwise specified.

Range	Typical Counts	Least Significant Bit - <small>Based on 1000 Sps (LSB_{min})</small>
Differential Mode		
±20 V	2	0.30
±10 V	2	0.30
±5 V	3	0.45
±4 V	3	0.45
±2.5 V	4	0.61
±2 V	5	0.76
±1.25 V	7	1.06
±1 V	8	1.21
Single Ended Mode		
±10 V	2	0.30

Resolution: 12 bits, 1 in 4096.
 Number of channels: 2.
 Throughput: Maximum throughput (scrambling to computer memory depends on the computer being used).
 Single channel: 50/55 single channel Sps, system-dependent.
 Hardware paced: Hardware paced.
 Single channel: 10 Ks/s.
 Output drive (each I/O): 15 mA.
 Power: 0 V to 4.06 V.
 Accuracy (all values are ±):
 Gain error at full scale: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Nonlinearity: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Offset: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 85 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 0 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 100 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 150 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 200 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 250 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 300 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 350 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 400 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 450 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 500 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 550 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 600 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 650 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 700 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 750 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 800 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 850 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 900 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 950 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1000 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1050 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1100 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1150 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1200 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1250 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1300 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1350 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1400 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1450 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1500 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1550 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1600 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1650 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1700 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1750 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1800 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1850 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1900 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 1950 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2000 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2050 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2100 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2150 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2200 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2250 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2300 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2350 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2400 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2450 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2500 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2550 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2600 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2650 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2700 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2750 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2800 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2850 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2900 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 2950 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3000 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3050 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3100 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3150 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3200 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3250 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3300 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3350 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3400 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3450 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3500 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3550 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3600 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3650 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3700 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3750 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3800 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3850 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3900 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 3950 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4000 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4050 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4100 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4150 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4200 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4250 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4300 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4350 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4400 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4450 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4500 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4550 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4600 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4650 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4700 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4750 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4800 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4850 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4900 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 4950 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 5000 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 5050 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 5100 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 5150 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 5200 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 5250 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 5300 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 5350 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 5400 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 5450 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 5500 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).
 Accuracy at 5550 °C: ±0.1% (10 V), ±0.1% (5 V), ±0.1% (2.5 V), ±0.1% (2 V), ±0.1% (1.25 V), ±0.1% (1 V).<