



**Tiago Rafael Cunha
da Silva**

**Análise de Soluções de Amortecimento Passivo
para o Circuito Refrigerante de Bombas de Calor**



**Tiago Rafael Cunha
da Silva**

**Análise de Soluções de Amortecimento Passivo
para o Circuito Refrigerante de Bombas de Calor**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Rui António da Silva Moreira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Jürgen Herbst, Engenheiro Acústico do Departamento TT-RHP/Eng-A da Bosch Termotecnologia S.A..

Esta dissertação teve o apoio dos projetos

UID/EMS/00481/2019-FCT -
FCT - Fundação para a Ciência e
a Tecnologia;

CENTRO-01-0145-FEDER-
022083 - Programa Operacional
Regional do Centro (Centro2020),
através do Portugal 2020 e do
Fundo Europeu de Desenvolvi-
mento Regional;

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Joaquim Alexandre Mendes de Pinho da Cruz
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais/Comitee

Prof. Doutor José Fernando Dias Rodrigues
Professor Associado da Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia

Prof. Doutor Rui António da Silva Moreira
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

**Agradecimentos /
Acknowledgements**

Gostaria de começar por agradecer ao meu orientador o Professor Doutor Rui Moreira por toda a paciência e auxílio prestado nesta dissertação.

Ao Doutor Jürgen Herbst da Bosch Termotecnologia e a Bosch Termotecnologia por terem suportado esta dissertação.

Aos meus pais por todo o suporte neste longo percurso.

À Marta por toda a compreensão, ajuda e paciência.

Palavras-chave

Amortecimento; Tubos; Viscoelásticos

Resumo

Este trabalho tem por objetivo desenvolver e estudar uma solução de tratamento passivo para a tubagem do circuito refrigerante de uma bomba de calor de forma a reduzir o ruído emitido por este componente.

Para alcançar este objetivo, foi desenvolvido um trabalho numérico e experimental sobre vigas e tubos com tratamentos viscoelásticos, servindo os resultados obtidos nas vigas como referência ao estudo realizado.

Face à reduzida eficiência dos tratamentos quando aplicados em tubos, foi proposta e estudada numérica e experimentalmente uma forma de tratamento alternativa.

A alternativa proposta permitiu atingir fatores de amortecimento modais próximos de 4% em tubos que são considerados representativos da tubagem existente no circuito refrigerante de bombas de calor.

Keywords

Damping; Pipes; Viscoelastic

Abstract

In this dissertation, is presented, an analysis of passive damping solutions for the heat pump cooling circuit. This work aims to create a solution capable of providing damping on the heat pump pipes, in order to decrease the noise emitted by it, using passive damping treatments.

To achieve this main goal, numerical and experimental analyses on beams and pipes were carried out.

Surface damping treatments were applied on both geometries and the beam results were used as reference in this study.

Due to the reduced efficiency of conventional constrained damping layers on pipes, an alternative solution was implemented and tested, both numerically and experimentally.

Experimental results evidence 4% of damping in pipes similar to those used in the heat pump colling circuit.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	2
1.2	Objetivos	4
1.3	Estrutura do documento	4
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Ruído e vibração	5
2.2	Análise Modal	6
2.3	Simulação Numérica - Método dos Elementos Finitos	7
2.4	Amortecimento	8
2.5	Tratamentos de Amortecimento	8
2.5.1	Controlo de Vibrações Ativo, Passivo e Híbrido	9
2.5.2	Amortecimento Passivo	9
2.5.3	Amortecimento Ativo	12
2.5.4	Amortecimento Híbrido	13
2.6	Tratamentos de Amortecimento em Tubos	15
2.7	Tratamentos de Amortecimento em Vigas	17
2.8	Materiais Viscoelásticos	18
2.8.1	Modelos Clássicos que Caracterizam Materiais Viscoelásticos	18
2.8.2	Efeito da Temperatura nos Materiais Viscoelásticos	18
2.8.3	Efeito da Frequências nos Materiais Viscoelásticos	20
2.8.4	Módulo Complexo	20
2.9	MSE-Modal Strain Energy	21
3	Metodologia	23
3.1	Equipamento Utilizado no Ensaio Experimental	23
3.1.1	Metodologia de análise através de um teste de impacto	23
3.1.2	Metodologia de análise através de um teste com excitador eletro- dinâmico	24
3.2	Tratamento posterior de dados	27
3.2.1	Tratamento dos Dados em Matlab	27
3.2.2	Pós-processamento dos Dados Obtidos	28
3.2.3	Pós-processamento com o MEscope	29
3.3	Simulação no Femap/Nx Nastran	29
3.3.1	Propriedades Mecânicas dos Tubos de Cobre	30
3.3.2	Propriedades Mecânicas dos Restantes Materiais	31
3.3.3	MSE Utilizando o Femap	32

4	Análise	35
4.1	Análise das Vigas	35
4.1.1	Vigas sem Tratamento	36
4.1.2	Vigas com Tratamento	39
4.1.3	Discussão de Resultados	46
4.2	Análise dos Tubos	49
4.2.1	Tubos sem Tratamento	49
4.2.2	Tubos com Tratamento	52
4.3	Comparação e Discussão de Resultados	65
5	Proposta Final	69
5.1	Estudo Numérico	70
5.1.1	Estudo Numérico dos Protótipos Criados	72
5.2	Estudo Experimental	79
5.2.1	Amortecimento na Direção Ortogonal	81
5.3	Análise Económica	82
5.4	Comparação e Discussão de resultados	83
5.4.1	Comparação do Protótipo 1 com o Tratamento Superficial na Con- figuração 1	88
6	Conclusão	89
6.1	Sugestões de Trabalhos Futuros	90
A	Funções FRF (Magnitude)	95
B	Modos Naturais	111
C	Desenhos Técnicos	113
D	Orçamentos	117
E	Tabelas	119
F	MSE com Recurso ao Femap	123
F.1	Passos no Femap	123
F.2	Código Matlab	123

Lista de Tabelas

3.1	Propriedades do Cobre	30
3.2	Propriedades do Alumínio	31
3.3	Propriedades do Viscoelástico	31
4.1	Características das vigas	36
4.2	Resultados numéricos para a viga de 25mm	36
4.3	Resultados numéricos para a viga de 30mm	37
4.4	Amortecimento para a viga de 25mm	37
4.5	Amortecimento para a viga de 30mm	39
4.6	Resultados numéricos para a viga de 25mm com tratamento 3M 434	40
4.7	Resultados numéricos para a viga de 25mm com tratamento 3M espesso	40
4.8	Resultados numéricos para a viga de 25mm com manga térmorretrátil	41
4.9	Resultados experimentais para a viga de 25mm tratada com 3M 434	43
4.10	Resultados experimentais para a viga de 25mm tratada com 3M espesso	44
4.11	Resultados experimentais para a viga de 25mm tratada com HellermannTyton EPS300	45
4.12	Resultados experimentais para a viga de 30mm tratada com aglomerado cortiça e alumínio	45
4.13	Massa adicionada pelos tratamentos às vigas	47
4.14	Dimensões tubos retos	50
4.15	Resultados numéricos dos tubos sem tratamento	51
4.16	Resultados experimentais para o teste de impacto	51
4.17	Resultados experimentais para os ensaios dos tubos com excitador eletrodinâmico	52
4.18	Resultados experimentais para o Tubo 1 (17mm)	52
4.19	Comparação de resultados para tubo 1	52
4.20	Comparação de resultados para tubo 2	52
4.21	Comparação de resultados para tubo 3	52
4.22	Resultados numéricos para o tratamento da 3M espesso na configuração 1	53
4.23	Resultados numéricos para o tratamento da 3M espesso na configuração 2	54
4.24	Resultados numéricos para o tratamento da 3M espesso na configuração 3	55
4.25	Resultados numéricos para o tratamento da 3M espesso na configuração 4	55
4.26	Resultados experimentais para o tubo de 17mm com tratamento da 3M espesso na configuração 1	61
4.27	Resultados experimentais para o tubo de 17mm com tratamento da 3M espesso na configuração 2	61

4.28	Resultados experimentais para o tubo de 17mm com tratamento da 3M espesso na configuração 3	62
4.29	Resultados experimentais para o tubo de 17mm com tratamento da 3M espesso na configuração 4	62
4.30	Resultados experimentais para o tubo de 17mm com tratamento da 3M em helicoidal	62
4.31	Resultados experimentais para o tubo de 17mm com manga Cellpack SR2	62
4.32	Resultados experimentais para o tubo de 17mm com manga HellermannTyton SE28	62
4.33	Resultados experimentais para o tubo de 17mm com manga HellermannTyton EPS300	63
4.34	Resultados experimentais para o tubo de 17mm com manga HellermannTyton HA67	63
4.35	Resultados experimentais para o tubo de 17mm com tratamento da 3M na configuração 1 com o dobro da largura inicial	63
4.36	Resultados experimentais para o tubo de 17mm com tratamento longitudinal de aglomerado de cortiça e alumínio na configuração 1	63
4.37	Resultados experimentais para o tubo de 17mm com tratamento de aglomerado de cortiça e alumínio como camada de restrição em espiral	63
4.38	Resultados experimentais para o tubo de 17mm com manga térmica HellermannTyton Tan 32	64
4.39	Massa adicionada ao tubo	66
5.1	Características dos protótipos criados	75
5.2	Análise numérica Protótipo 1	76
5.3	Análise numérica Protótipo 2	77
5.4	Análise numérica Protótipo 3	78
5.5	Resultados experimentais para o Protótipo 1	79
5.6	Resultados experimentais para o Protótipo 2	81
5.7	Resultados experimentais para o Protótipo 3	81
5.8	Análise experimental Protótipo 1 (direção ortogonal)	81
5.9	Análise experimental Protótipo 2 (direção ortogonal)	81
5.10	Análise experimental Protótipo 3 (direção ortogonal)	82
5.11	Orçamento	82
5.12	Massa adicionada	84
A.1	Coordenadas	95
E.1	Variação de Amortecimento e Frequência	119
E.2	Variação de Amortecimento e Frequência	120
E.3	Variação de Amortecimento e Frequência	121
E.4	Variação de Amortecimento	121
E.5	Variação de Amortecimento Ortogonal	121

Lista de Figuras

1.1	Diagrama de funcionamento de uma bomba de calor adaptado de [8]	2
1.2	Circuito refrigerante de uma bomba de calor [9]	2
1.3	Abraçadeira amortecida [10]	3
2.1	Sistema com um grau de liberdade [18]	6
2.2	Formas modais de uma viga simplesmente apoiada	7
2.3	Resposta livre do sistema com um grau de liberdade, com e sem amortecimento [23]	8
2.4	Tratamento sem camada de restrição	10
2.5	Tratamento com camada de restrição	10
2.6	Tratamento integrado	11
2.7	Amortecimento com piezoelétricos em circuito fechado (Adaptado de [24])	11
2.8	Amortecimento com camadas viscoelásticas ligadas a piezoelétricos em circuito fechado (Adaptado de [24])	12
2.9	Diferentes configurações da camada de restrição magnética (Adaptado de [24])	12
2.10	Amortecimento ativo (Adaptado de [24])	13
2.11	Camada ativa de restrição piezoelétrica (Adaptado de [24])	13
2.12	Camada ativa de restrição piezoelétrica (Adaptado de [24])	14
2.13	Amortecimento eletromagnético com compósitos (Adaptado de [24])	14
2.14	Circuito fechado com piezoelétricos ativos (Adaptado de [24])	15
2.15	Tratamento com material viscoelástico em tubo [31]	15
2.16	Tratamento desmontável [32]	16
2.17	Vista lateral do tratamento de House [33]	16
2.18	Vista da secção do tratamento de House [33]	16
2.19	Uso de contrapesos no circuito de um sistema de escape automóvel [34] . .	17
2.20	Alteração das frequências naturais [37]	18
2.21	Modelos caracterizadores de materiais viscoelásticos	19
2.22	Variação do módulo de armazenamento e do fator de perda em função da temperatura (Adaptado de [24])	19
2.23	Variação do módulo de armazenamento e do fator de perda em função da frequência (Adaptado de [24])	20
3.1	Martelo de impacto instrumentado e acelerómetro	24
3.2	Esquema do teste de impacto	24
3.3	Espuma necessária aos testes de impacto	24
3.4	Excitador eletrodinâmico	25

3.5	Vibrómetro Laser	25
3.6	Suporte do Vibrómetro Laser	26
3.7	Tubo suspenso	26
3.8	Parafuso colado	26
3.9	Adesivo refletor	27
3.10	Esquema do teste com excitador eletrodinâmico	27
3.11	Exemplo de uma FRF	28
3.12	Avaliação da massa do tubo	30
3.13	Ensaio de tração	31
3.14	Provete partido na zona da agarra	32
3.15	Distribuição da energia de deformação	33
4.1	Convenção de eixos adotada nas vigas	35
4.2	Formas modais numéricas para a viga de 25mm	37
4.3	Formas modais numéricas para a viga de 30mm	38
4.4	Metodologia de ensaio de vibração livre da viga	38
4.5	Tratamento 3M mais espesso	39
4.6	Formas Modais Numéricas para a Viga de 25mm com Tratamento 3M 434	41
4.7	Formas modais numéricas para a viga de 25mm com tratamento 3M mais espesso	42
4.8	Viga com tratamento da 3M 434	43
4.9	Viga com tratamento da 3M espesso	43
4.10	Viga de 25mm com manga EPS300	44
4.11	Viga de 30mm com aglomerado de cortiça e alumínio	44
4.12	Alteração do fator de amortecimento modal na viga	47
4.13	Variação absoluta do valor das frequências naturais	47
4.14	Variação relativa do valor das frequências naturais	48
4.15	Conjunto de eixos arbitrado para o tubo	49
4.16	Secção de corte do tubo	49
4.17	Tubos usados no estudo	50
4.18	Formas modais numéricas para o Tubo	51
4.19	Esquema das 4 configurações aplicadas	54
4.20	Viscoelástico deformado na simulação com manga termorretrátil	54
4.21	Viscoelástico deformado na configuração 1	55
4.22	Viscoelástico deformado na configuração 2	56
4.23	Viscoelástico deformado na configuração 3	57
4.24	Viscoelástico deformado na configuração 4	58
4.25	Tubo com tratamento da 3M espesso na configuração 1	59
4.26	Tubo com tratamento da 3M espesso na configuração 2	59
4.27	Tubo com tratamento da 3M espesso na configuração 3	60
4.28	Tubo com tratamento da 3M espesso na configuração 4	60
4.29	Tubo com tratamento da 3M espesso em Espiral	60
4.30	Tubo com aglomerado de cortiça em espiral	60
4.31	Tubo com tratamento de aglomerado de cortiça e alumínio	60
4.32	Tubo com manga termorretrátil Cellpack	60
4.33	Tubo com manga termorretrátil HellermanTyton HA67	61
4.34	Tubo com Manga Termorretrátil HellermanTyton EPS300	61

4.35	Tubo com manga termorretrátil HellermanTyton TAN32	61
4.36	Tubo com manga termorretrátil HellermanTyton SE28	61
4.37	Alteração absoluta do valor das frequências naturais	67
4.38	Alteração relativa do valor das frequências naturais	67
4.39	Alteração do fator de amortecimento modal no tubo	68
5.1	Imagem demonstrativa da Proposta	69
5.2	Camada viscoelástica sujeita a deformação de corte no protótipo criado . .	70
5.3	Sistema de eixos	70
5.4	Deslocação do sistema longitudinalmente (variação do comprimento da viga e posicionamento das abraçadeiras)	71
5.5	Deslocação do sistema transversalmente (variação da altura da abraçadeira)	71
5.6	Variação do fator de perda em função do comprimento da viga	72
5.7	Variação da 1ª frequência natural em função do comprimento da viga . . .	72
5.8	Variação do fator de perda em função da altura da abraçadeira (h)	73
5.9	Variação da 1ª frequência natural em função da altura da abraçadeira (h)	73
5.10	Variação do fator de perda em função da espessura do viscoelástico	74
5.11	Frequência em função da espessura do viscoelástico	74
5.12	Energia de deformação na direção ortogonal	74
5.13	Formas modais numéricas do Protótipo 1	75
5.14	Formas modais numéricas do Protótipo 2	76
5.15	Formas modais numéricas do Protótipo 3	77
5.16	Protótipos usados no estudo experimental	79
5.17	Fixação do Protótipo	80
5.18	Montagem Experimental	80
5.19	Segundo modo de flexão	84
5.20	FRFs diretas no sentido do dispositivo aplicado	84
5.21	Variação absoluta das frequências naturais na direção do plano da face do dispositivo	85
5.22	Variação relativa das frequências naturais na direção do plano da face do dispositivo	85
5.23	Variação do fator de amortecimento modal na direção do plano da face do dispositivo	86
5.24	Variação absoluta das frequências naturais na direção do plano ortogonal ao da face do dispositivo	86
5.25	Variação relativa das frequências naturais na direção do plano ortogonal ao da face do dispositivo	87
5.26	Variação do fator de amortecimento modal na direção do plano ortogonal ao da face do dispositivo	87
5.27	FRFs diretas no sentido ortogonal ao do dispositivo aplicado	87
5.28	Comparação das melhores soluções	88
5.29	Comparação da eficiência dos tratamentos	88
A.1	Função FRF direta da Viga de 25mm	96
A.2	Função FRF direta da Viga de 30mm	96
A.3	Função FRF direta da Viga de 25mm com Tratamento da 3M 434	97
A.4	Função FRF direta da Viga de 25mm com tratamento da 3M espesso	97

A.5	Função FRF direta da Viga de 25mm com manga térmica HellermannTyton	98
A.6	Função FRF direta da Viga de 25mm com Cortiça e Alumínio	98
A.7	Função FRF direta tubo 17mm (Tipo1)	99
A.8	Função FRF direta tubo 10mm (Tipo2)	99
A.9	Função FRF direta tubo 9,5mm (Tipo3)	100
A.10	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com manga retrátil Cellpack SR2	100
A.11	Função FRF direta do tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com manga retrátil HellermannTyton SE28	101
A.12	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com manga retrátil HellermannTyton EPS300	101
A.13	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com manga retrátil HellermannTyton HA67	102
A.14	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com manga retrátil HellermannTyton TAN32	102
A.15	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com Tratamento 3M na configuração 1	103
A.16	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com Tratamento 3M na configuração 2	103
A.17	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com Tratamento 3M na configuração 3	104
A.18	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com Tratamento 3M na configuração 4	104
A.19	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta tubo com Tratamento 3M na configuração 1 com o dobro da espessura inicial	105
A.20	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta tubo com Tratamento 3M na configuração 1 com cortiça e alumínio	105
A.21	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta tubo com Tratamento de cortiça com camada de restrição em alumínio em espiral	106
A.22	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF do Tubo com o Protótipo 1	106
A.23	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF do Tubo com o Protótipo 2	107
A.24	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF do Tubo com o Protótipo 3	107
A.25	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF do Tubo com o Protótipo 1 Medida na ortogonal	108
A.26	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF do Tubo com o Protótipo 2 Medida na ortogonal	108
A.27	Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF do Tubo com o Protótipo 3 Medida na ortogonal	109
B.1	Modos de Flexão para as vigas	111
B.2	Modos de Flexão para as tubagens	112
D.1	Orçamento para Abraçadeira 1	117
D.2	Orçamento para Abraçadeira 2	117

Lista de Acrónimos

- ACLD** *Active Constrained Layer Damping* (Tratamento com restrição ativa)
- AEF** Análise de Elementos Finitos
- APDC** *Active Piezoelectric Damping Composites* (Tratamento com compósitos piezoelétricos ativos)
- CLD** *Constrained Layer Damping* (Tratamento de amortecimento com camada de restrição)
- CMIF** *Complex Mode Indicator Function* (Função de identificação modal complexa)
- CNC** Comando Numérico Computorizado
- EMDC** *EletroMagnetic Damping Composites* (Tratamentos de amortecimento com compósitos eletromagnéticos)
- FLD** *Free Layer Damping* (Tratamento de amortecimento sem camada de restrição)
- FRF** Função Resposta em Frequência
- ILD** *Integrated Layer Damping* (Tratamento de amortecimento integrado)
- MCLD** *Magnetic Layer Damping* (Tratamento de amortecimento magnético)
- MEF** Método dos Elementos Finitos
- MMIF** *Multivariate Mode Indicator Function* (Função de identificação Modal Multivariável)
- MSE** *Modal Strain Energy* (Fator de energia modal)

Capítulo 1

Introdução

Uma vibração mecânica é o movimento de uma partícula ou de um corpo que oscila em torno de uma posição de equilíbrio, e esta surge geralmente quando um sistema é deslocado da sua posição de equilíbrio estável [1].

Entendem-se como fontes sonoras os dispositivos capazes de vibrar e que, como consequência dessa vibração, emitem som [2].

O ouvido humano é extremamente sensível e suscetível ao ruído emitido pelas fontes sonoras. A exposição ao ruído ambiental pode provocar danos no organismo, para além das perdas auditivas, como, esgotamento físico, alterações químicas, metabólicas e mecânicas do órgão sensorial auditivo, o que pode traduzir-se em mudanças do ritmo biológico, afetando assim a saúde e a qualidade do sono [3].

As bombas de calor são alternativas económicas de recuperação de calor de diferentes fontes, como tal, devido à sua elevada eficiência energética geral, são muito utilizadas nos setores industrial, comercial e residencial [4].

As bombas de calor, tal como grande parte das máquinas térmicas, utilizam circuitos de tubos em cobre, pois este material além de assegurar uma boa transferência de calor, é também quimicamente compatível com a maior parte dos fluídos refrigerantes [5], o que implica que não se degrada facilmente quando em contacto com estes [6]. Estes tubos de cobre emitem ruído devido às vibrações inerentes ao funcionamento da bomba de calor.

A presente dissertação tem como finalidade oferecer uma solução para o problema descrito, o ruído emitido pelas tubagens de uma bomba de calor. Para solucionar este problema é necessário recorrer a soluções de amortecimento passivo, as quais, geralmente recorrem ao uso de materiais viscoelásticos. Estes materiais são ótimos para tratamentos superficiais, pois oferecem uma capacidade dissipativa às estruturas onde se encontram aplicados.

1.1 Enquadramento

A Bosch Termotecnologia gere a unidade de negócios de água quente residencial. Atualmente a empresa fornece soluções de água quente através de esquentadores (elétricos e a gás), caldeiras e bombas de calor [7]. As bombas de calor são soluções de recuperação de calor tal como se referiu anteriormente, e o seu funcionamento é semelhante ao de um frigorífico, mas de modo inverso. No frigorífico o calor é conduzido desde o interior até ao exterior, enquanto que na bomba de calor, o calor do ar é conduzido para o interior da casa através do sistema de aquecimento. Como muitas máquinas térmicas do género, o seu circuito de aquecimento é composto por um compressor, um condensador, um evaporador e uma válvula de expansão.

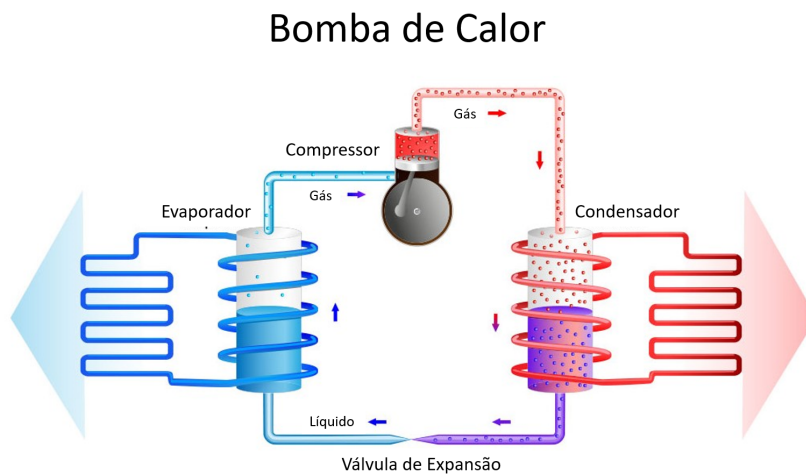


Figura 1.1: Diagrama de funcionamento de uma bomba de calor adaptado de [8]

A servir de elemento de ligação entre os componentes da bomba de calor estão tubagens, geralmente, em cobre. Dentro deste circuito, circula um gás refrigerante e são as propriedades deste gás que possibilitam o aquecimento ou arrefecimento, provocado pela sua compressão ou expansão. Assim sendo, o refrigerante é comprimido até atingir uma temperatura suficiente alta para o aquecimento.



Figura 1.2: Circuito refrigerante de uma bomba de calor [9]

Todos os componentes de maior porte são conectados à estrutura da máquina, seja por parafusos ou rebites, contudo as tubagens ficam suspensas entre pontos de amarração. Avaliando o funcionamento da bomba, depreende-se que as vibrações presentes nas tubagens possam ter diversas origens. Podem ser inerentes ao funcionamento do compressor, como também podem ser originadas pelo movimento do fluido refrigerante no seu interior. Para resolver este problema, a solução tinha que conseguir, de alguma forma diminuir a energia de vibração dos tubos, mas para isto é necessário obedecer a alguns pré-requisitos, entre os quais:

- Ser economicamente viável;
- Fácil de aplicar em ambiente industrial;
- Ser possível de aplicar numa máquina já existente;

A maneira mais eficaz de reduzir a energia de vibração de um sistema é aplicar-lhe uma forma de dissipação de energia de vibração. Contudo, tendo em conta os pré-requisitos anteriores, várias soluções tiveram que ser excluídas. O facto de ter que servir como um *retrofit* para uma máquina já existente, inviabilizava a possibilidade de modificar algum dos componentes já existentes na máquina. Assim sendo, eliminou-se, de imediato soluções que envolvessem a utilização de apoios viscoelásticos conectados à estrutura da máquina, como os ilustrados na Figura 1.3.



Figura 1.3: Abraçadeira amortecida [10]

A disposição díspar dos tubos no interior da máquina impossibilitava também o uso de algum isolamento que permitisse absorver o ruído e evitasse que este se transmitisse para o exterior.

O fator económico determinou que se excluíssem tratamentos mais complexos e dispendiosos, como por exemplo, soluções de amortecimento ativo ou híbridas.

Todas as condições anteriores conduziram ao uso de um sistema passivo de amortecimento, que recorre ao uso dum tratamento superficial composto por materiais viscoelásticos. Estes materiais conferem uma capacidade dissipativa à estrutura, no entanto, possuem a vantagem de serem económicos, adicionarem pouca massa à estrutura e de a modificação estrutural ser praticamente inexistente. Apenas recorrendo a um tratamento

destes é possível criar uma solução que possa ser montada numa máquina já existente, não alterando em nada o seu funcionamento, nem interferindo com nenhum dos componentes à exceção das tubagens tratadas.

1.2 Objetivos

Os objetivos desta dissertação prendem-se, sobretudo, em fornecer uma solução para o problema proposto, apresentado pela Bosch Termotecnologia.

Para tal, realizar-se-á uma análise a soluções de amortecimento passivo para o circuito refrigerante de uma bomba de calor. Para atingir este objetivo, pretende-se, avaliar a influência da aplicação de diferentes soluções existentes no mercado, aplicadas segundo diferentes configurações.

Recorrer-se-á a vigas por estas terem uma geometria simples e por já existirem inúmeros estudos que comprovam um bom amortecimento, quando tratadas com sistemas passivos de amortecimento. Além disso, esperar-se-ia que o seu comportamento dinâmico fosse similar ao dos tubos em estudo, como tal, realizar-se-ão ensaios de vibrações antes e após a aplicação dos tratamentos passivos nas vigas, de modo a extrapolar os resultados obtidos, para os tubos. Espera-se, deste modo, verificar a influência destes tratamentos no comportamento dinâmico das vigas, bem como, obter uma qualificação dos mesmos, para posteriormente aplicar os que apresentem melhores resultados, nos tubos. Pretende-se complementar esta análise experimental com uma numérica, de modo a corroborar os resultados obtidos.

Após a análise das vigas, repetir-se-á o mesmo procedimento para os tubos. Inicialmente, este será efetuado para os tubos simples, e posteriormente, para os tubos com os tratamentos de maior sucesso no estudo das vigas. Terminado este estudo, será tido em conta um dispositivo híbrido, que combina os dois objetos anteriores (viga e tubo) e espera-se que este seja mais eficaz do que os tratamentos superficiais até então aplicados no tubo.

1.3 Estrutura do documento

Este documento encontra-se dividido em 6 capítulos. O primeiro contém a introdução, o enquadramento e os objetivos. O segundo contém a revisão bibliográfica, abordando temas como amortecimento, tratamentos de amortecimento e materiais viscoelásticos.

No terceiro capítulo, encontra-se descrita toda a metodologia utilizada no desenvolvimento desta dissertação, no quarto encontram-se dispostas as várias análises realizadas e a discussão de resultados.

No quinto capítulo, apresenta-se a proposta final, onde constam os dois tipos de análise e a discussão dos resultados obtidos. Por fim, o último capítulo, contém a conclusão e algumas sugestões para trabalhos futuros.

No Anexo A encontram-se as funções de resposta em frequência diretas de todos os ensaios realizados. O Anexo B contém os modos naturais obtidos, experimentalmente, dos tubos e das vigas. O Anexo C apresenta alguns desenhos técnicos e o Anexo D contém orçamentos para as abraçadeiras do dispositivo. O Anexo E inclui tabelas que indicam as diferenças das variações de amortecimento e das frequências dos objetos tratados face aos sem tratamento.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Ruído e vibração

Existe uma preocupação comum em reduzir o ruído provocado pelos equipamentos domésticos, que é tornada cada vez mais relevante quando se está perante um mercado competitivo, como o das bombas de calor, onde o ruído emitido pela máquina pode ser um fator decisivo na compra. O ruído pode ser entendido como um som desagradável ou indesejável para o ouvido humano, e o som entende-se como qualquer variação da pressão atmosférica que possa ser ouvida, seja no ar, na água ou em qualquer meio de propagação. Essa pressão, denominada de pressão sonora, é expressa em decibel, dB, que é uma razão logarítmica entre a pressão sonora e o valor de referência, e a sua escala de valores varia entre 0 dB (limiar da audição) e 140 dB (limiar da dor). Há uma maior sensibilidade do ouvido às frequências médias, correspondente à voz humana [11].

As variações de pressão que provocam o som podem ter origens distintas. No caso de equipamentos e máquinas, é possível observar vibrações inerentes ao seu funcionamento, que originam variações de pressão no meio. Uma vibração caracteriza-se por ser um movimento oscilatório de um corpo, da sua posição de equilíbrio originado por uma transferência entre a energia potencial e cinética associadas [12].

Muitos dos casos que envolvem problemas de vibrações e/ou ruído estão relacionados com fenómenos de ressonância da estrutura [13]. A ressonância ocorre quando o corpo sofre uma vibração forçada com uma frequência de excitação igual à frequência de ressonância, sendo esta última uma propriedade inerente ao corpo. A frequência natural é uma característica do sistema e quando se excita o sistema a esta, ele entra em ressonância. O fenómeno de ressonância é particularmente perigoso, pois caso a estrutura seja operada nas suas frequências de ressonância, as vibrações a que a estrutura está sujeita, mesmo que sejam de baixa amplitude, serão amplificadas criando vibrações de grande amplitude, podendo originar o colapso da mesma [14].

Cada objeto tem um conjunto de frequências naturais associado, sendo esta uma propriedade distintiva, tal como a forma ou a cor. Geralmente, este depende de aspetos como a massa, a forma, e o material que o constitui. É possível descobrir estas frequências efetuando uma análise modal ao objeto.

2.2 Análise Modal

A análise modal é uma ferramenta importante na área da engenharia. É fundamental que no projeto ou desenvolvimento de um componente ou estrutura, sejam conhecidas as suas características, nomeadamente, as suas frequências naturais. Dependendo da finalidade do objeto, pode ser importante garantir que seja operado longe desta gama de frequências, como por exemplo, no caso de uma ponte.

Caracteriza-se a análise modal como o processo de descrever um corpo, utilizando técnicas teóricas e experimentais que possibilitam a construção de um modelo matemático representativo do comportamento dinâmico do corpo [15]. Com esta análise, é possível identificar as características modais de um corpo, tais como as frequências naturais, formas modais (forma assumida pelo corpo em cada frequência natural) e o fator de perda [16].

Para um sistema com um grau de liberdade, como o que se encontra na Figura 2.1, a frequência natural é calculada a partir da raiz quadrada do quociente da rigidez pela massa [17].

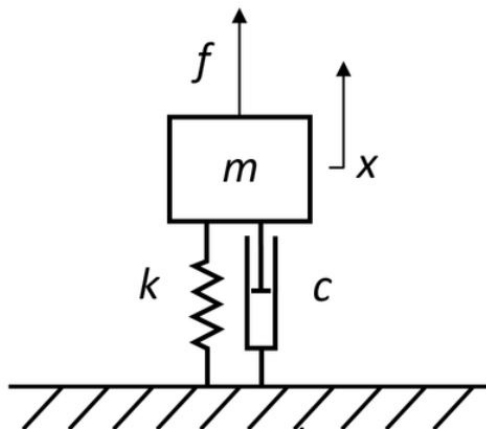


Figura 2.1: Sistema com um grau de liberdade [18]

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.1)$$

Através da Equação 2.1 é possível verificar que a frequência natural é uma propriedade inerente ao objeto, e que a única maneira de a alterar é variar a sua massa (variável m na Equação 2.1) ou a sua rigidez (variável k na Equação 2.1). A sua massa depende diretamente e proporcionalmente do volume e da densidade material, enquanto que a rigidez, depende da configuração, do módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson* do material.

As estruturas podem ter várias frequências naturais e vibrar de maneiras diferentes em cada uma delas, como se pode verificar na Figura 2.2. A forma como a estrutura se deforma quando é excitada a uma frequência natural, denomina-se forma modal. Estas formas podem ter o aspeto de ondas, e como tal possuem regiões chamadas de zonas nodais, que são os pontos da estrutura que permanecem fixos, enquanto que as regiões que se deslocam, são denominadas de zonas antinodais.

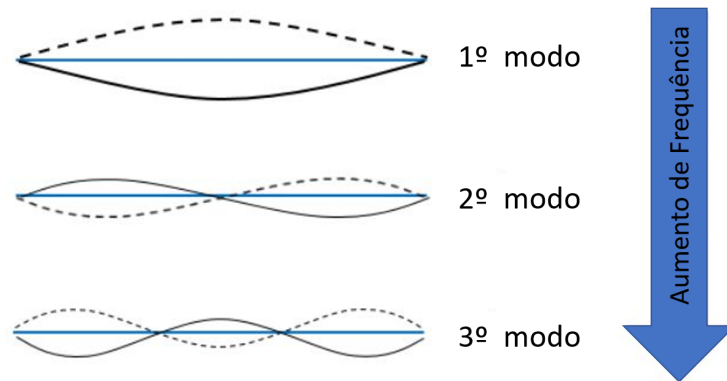


Figura 2.2: Formas modais de uma viga simplesmente apoiada

Existem diversas formas de executar um ensaio modal experimental. Em todas elas, existe um equipamento a introduzir um carregamento dinâmico conhecido na estrutura a ser estudada, e ainda, um conjunto de transdutores a medir a resposta da estrutura.

Geralmente, utilizam-se martelos de impacto, excitadores eletromagnéticos, ou atuadores hidráulicos para introduzir um carregamento controlado na estrutura.

Para medir a resposta, utilizam-se acelerômetros ou um vibrômetro laser para medir a aceleração ou a velocidade da superfície, respetivamente [19].

É possível estabelecer uma relação entre o estímulo aplicado e a resposta do objeto em resultado do mesmo, à qual se dá o nome de Função Resposta em Frequência (FRF) [20].

No trabalho a desenvolver, os resultados obtidos a partir da análise experimental serão correlacionados com os resultados obtidos a partir de uma simulação numérica, que terá como base o Método dos Elementos Finitos (MEF).

2.3 Simulação Numérica - Método dos Elementos Finitos

É possível identificar propriedades de estruturas, como a frequência natural e os modos naturais, realizando uma Análise de Elementos Finitos (AEF), através de métodos matemáticos computacionais, tais como o Método dos Elementos Finitos (MEF).

O Método dos Elementos Finitos é um procedimento numérico de análise e resolução de problemas científicos e de engenharia, que apresenta uma solução aproximada. Este método é utilizado para solucionar problemas complexos, de diversas áreas de conhecimento, para os quais não se conhece uma solução exata, ou que possa ser expressa de forma analítica. Assim sendo, o MEF classifica-se como sendo um método numérico e não analítico. Para efetuar uma análise numérica deste tipo, é crucial definir a geometria do objeto, as propriedades materiais, o carregamento e as condições de fronteira do objeto [21].

Nesta dissertação será utilizado o *software* Nastran NX, para executar a simulação numérica das estruturas desejadas, recorrendo ao Femap como pré e pós-processador.

2.4 Amortecimento

O amortecimento pode ser definido como a dissipação de energia de um corpo, ou sistema, como se pode verificar na Figura 2.3. Apesar de poder dissipar energia sob várias formas, o amortecimento associa-se principalmente à conversão irreversível de energia mecânica em térmica [22].

O amortecimento pode ser classificado quanto a sua origem, como por exemplo:

- Amortecimento Material: dissipação de energia devido a efeitos físicos que permitem dissipar parte da energia de deformação e cinética de um sistema mecânico.
- Amortecimento Estrutural: amortecimento por mecanismos dissipativos externos: como por exemplo, radiação acústica, escoamento viscoso e transmissão de energia pelo suporte [12].
- Tratamentos de Amortecimento: mecanismos de amortecimento, ativos, passivos ou híbridos, dependendo se recebem energia e controlo do exterior, que são adicionadas à estrutura.

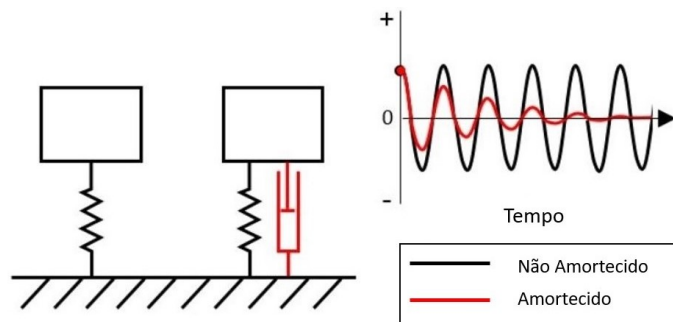


Figura 2.3: Resposta livre do sistema com um grau de liberdade, com e sem amortecimento [23]

2.5 Tratamentos de Amortecimento

Com o intuito de minimizar ou até eliminar as vibrações indesejadas, existem no mercado diversas soluções para o controlo de vibrações. Estas têm como foco atenuar amplitudes excessivas, suprimir ressonâncias indesejadas e evitar falhas devido à fadiga em estruturas e componentes estruturais [24].

Atendendo a que muitos dos acidentes ocorridos em estruturas foram devidos a falhas por fadiga, provocadas por carregamentos cíclicos [25], tornou-se imperativo recorrer ao controlo de vibrações para garantir a estabilidade dinâmica do sistema. Apenas dispondo destas tecnologias, é possível aumentar o amortecimento das estruturas, garantindo assim a efetividade da operação de plataformas silenciosas e estáveis para produção, comunicação e transporte [24].

2.5.1 Controlo de Vibrações Ativo, Passivo e Híbrido

De entre os sistemas de controlo de vibrações, destacam-se os métodos ativos, passivos e híbridos, que têm sido utilizados ao longo dos anos, recorrendo a uma variedade de formas estruturais, materiais de amortecimento, leis de controlo, atuadores e sensores.

Relativamente ao amortecimento passivo, este é eficaz em excitações de elevadas frequências, enquanto que o amortecimento ativo pode ser utilizado no controlo de baixas frequências. Atendendo a casos reais, em que o espetro de frequências comporta tanto as baixas frequências como as altas, é adequado recorrer a métodos de amortecimento híbrido [24].

2.5.2 Amortecimento Passivo

Estruturas comuns como vigas simples, ou até estruturas mais complexas, têm vindo a comportar tratamentos de amortecimento de vibrações, que se demonstraram eficientes. Dentro dos vários elementos passivos de amortecimento, incluem-se: tratamentos com base em materiais viscoelásticos, tratamentos com piezoelétricos, amortecimento com camada de restrição magnética, e ainda amortecimento recorrendo a fibras com memória de forma [24].

Tratamentos com materiais viscoelásticos

Nos tratamentos passivos os materiais viscoelásticos são utilizados predominantemente segundo três configurações. Uma das configurações é superficial com uma camada de restrição (CLD-Constrained Layer Damping), outra é superficial sem camada de restrição (FLD-Free Layer Damping) e ainda outra em que a camada de viscoelástico é integrada (ILD-Integrated Layer Damping) [26].

Todos os tipos de tratamento referidos nesta secção usam os materiais viscoelásticos para extrair a energia da estrutura vibrante e são classificados quanto à posição onde o viscoelástico está inserido.

As propriedades destes materiais são influenciadas pela temperatura e frequência de operação [27].

Tratamentos sem camada de restrição

Classificam-se como tratamentos sem camada de restrição os tratamentos onde o material viscoelástico é depositado na superfície da estrutura. Esta configuração, necessita de uma camada de viscoelástico muito espessa pois, como não têm uma camada de restrição, deforma-se em extensão. Do ponto de vista económico, estes tratamentos não são atrativos, por essa mesma razão. Dado que adicionam muita massa às estruturas, as suas aplicações são limitadas e utilizam-se geralmente em eletrodomésticos e painéis automóveis [27].

Este tratamento possui uma simulação numérica ou analítica relativamente simples e a sua eficiência é dependente da razão entre o módulo de ganho do material viscoelástico e o módulo extensional do material da estrutura, o faz com que seja necessário recorrer a materiais com elevado módulo de ganho neste tipo de tratamentos [26].

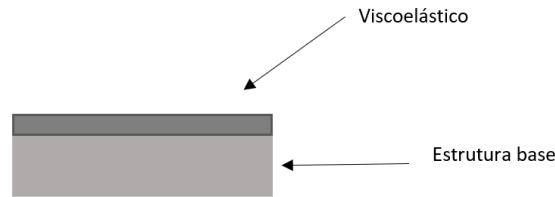


Figura 2.4: Tratamento sem camada de restrição

Tratamentos com camada de restrição (CLD)

Os tratamentos com restrição são tratamentos nos quais a camada de material viscoelástico é inserida entre a estrutura principal e uma camada de restrição. Nesta configuração os materiais ficam sujeitos a grandes níveis de tensão de corte, o que origina um movimento diminuto das superfícies adjacentes. Com esta configuração é possível obter tratamentos de amortecimento mais eficientes, pois são utilizadas camadas mais finas. O facto de existir uma camada de restrição também ajuda a proteger o material viscoelástico. Esta metodologia é mais eficiente do ponto de vista económico, a modificação estrutural é mínima e a massa adicionada é praticamente insignificante. A desvantagem dos tratamentos com restrição é que são complexos de projetar e simular [27].

Contrariamente ao que acontece na configuração sem camada de restrição, aqui os materiais viscoelásticos por norma utilizados apresentam um módulo de ganho relativamente baixo, promovendo assim a sua deformação em corte [26].

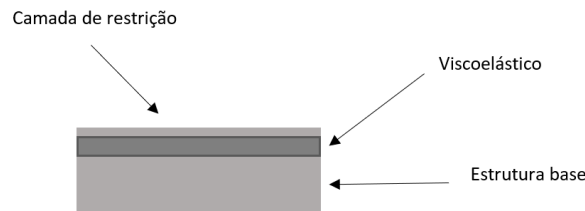


Figura 2.5: Tratamento com camada de restrição

Tratamentos Integrados (ILD)

Nos tratamentos integrados a camada de viscoelástico aplica-se no núcleo de uma placa *sandwich*.

Este tipo de tratamentos permite maximizar a eficiência do tratamento viscoelástico, uma vez que a deformação de corte que é induzida na camada de material viscoelástico é muito elevada por se encontrar sobre o plano neutro do conjunto. Este tratamento não é considerado um tratamento superficial à estrutura, mas sim um tratamento integrado na matéria prima.

Apesar de todas as vantagens, estes elementos apresentam algumas limitações, como por exemplo, uma baixa tolerância ao aquecimento (o que revela uma grande desvantagem perante a indústria onde são utilizados processos de solda e brasagem), um efeito de *Spring-back* considerável durante processos de dobragem e estampagem, e ainda colapso do núcleo em processos de corte e dobragem [27].

Existem tratamentos deste género, envolvendo fibras com memória de forma superelásticas no fabrico dos compósitos [24].



Figura 2.6: Tratamento integrado

Amortecimento com Piezoelétrico em Circuito Fechado

Estes tratamentos são compostos por filmes piezoelétricos, ligados a uma estrutura vibrante. Desta forma, convertem a energia da superfície que vibra, em energia elétrica, como se pode verificar na Figura 2.7. Este piezoelétrico é conectado a um circuito que contém uma resistência e deste modo, a energia elétrica é dissipada sob a forma de calor. Esta resistência é escolhida de forma a maximizar a energia dissipada de acordo com as características dos tratamentos. Os circuitos elétricos são usualmente resistivos, indutivos e/ou capacitivos [24].

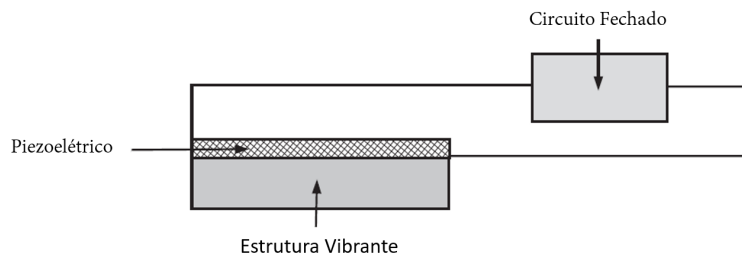


Figura 2.7: Amortecimento com piezoelétricos em circuito fechado (Adaptado de [24])

Camadas de Viscoelástico com Piezoelétricos em Circuito fechado

Este tratamento assemelha-se ao anterior, mas neste caso, o filme piezoelétrico é usado para restringir passivamente a deformação do viscoelástico em contacto com a estrutura vibrante (Figura 2.8). O filme é também usado como parte do circuito fechado, que é ajustado para melhorar as características de amortecimento do tratamento num espectro de frequências de interesse [24].

Camada de Restrição Magnética

Os tratamentos com camada de restrição magnética contêm tiras magnéticas (ímãs) com uma disposição especial, acopladas às camadas de viscoelástico. As características de amortecimento do viscoelástico podem ser majoradas devido a interação dos ímãs que podem aumentar a compressão ou o corte deste material.

Na Figura 2.9 encontram-se duas configurações possíveis para as camadas de restrição magnética. Na configuração A a interação entre os ímãs gera forças magnéticas

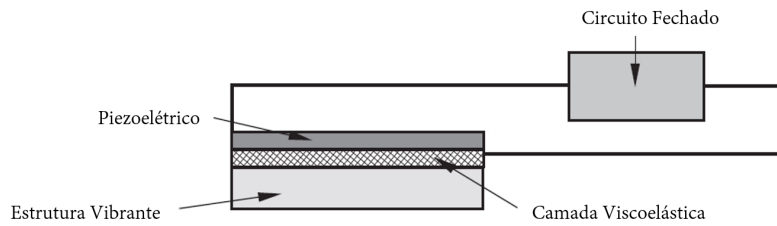


Figura 2.8: Amortecimento com camadas viscoelásticas ligadas a piezoelétricos em circuito fechado (Adaptado de [24])

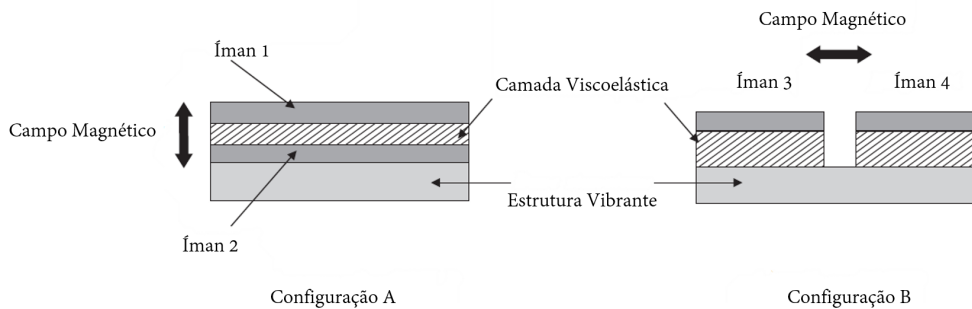


Figura 2.9: Diferentes configurações da camada de restrição magnética (Adaptado de [24])

perpendiculares ao eixo longitudinal da viga, comprimindo assim o viscoelástico. Na configuração B as forças magnéticas geradas são paralelas ao eixo longitudinal da viga e tendem a criar uma tensão de corte na camada viscoelástica [24].

2.5.3 Amortecimento Ativo

Apesar de simples e fiáveis, os métodos passivos assentam o seu funcionamento em materiais viscoelásticos. Dado que as propriedades destes materiais variam em função da temperatura e da frequência a que são submetidos, o seu espectro de aplicação é limitado. Como tal, quando submetidos a condições fora deste espectro, os tratamentos passivos podem-se mostrar falíveis. Assim sendo, houve a necessidade de criar um controlo ativo de amortecimento [24].

Os métodos de amortecimento ativo diferenciam-se dos passivos no sentido em que recebem energia ou controlo de uma fonte externa [22].

Os componentes básicos de um sistema destes incluem atuadores, sensores e uma unidade eletrónica de controlo, a qual é constituída por um amplificador e um filtro [28].

O dispositivo mais comum de amortecimento ativo recorre a filmes piezoelétricos acooplados a uma estrutura vibrante como representado na Figura 2.10. Além de controladores piezoelétricos, podem também ser utilizados atuadores hidráulicos ou eletrodinâmicos [24]. Os atuadores eletrodinâmicos são compostos por uma bobine montada no interior dum campo magnético constante. A resposta dos atuadores (à exceção do piezoelétrico) varia consideravelmente com a frequência. O atuador electro-hidráulico (também conhecido por servo-hidráulico) apresenta a vantagem de possuir um longo curso e elevados valores de força [29].

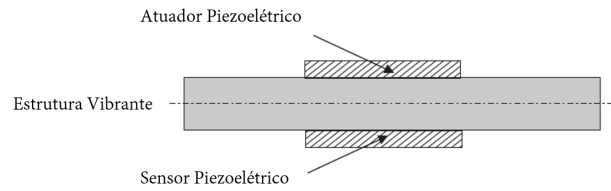


Figura 2.10: Amortecimento ativo (Adaptado de [24])

2.5.4 Amortecimento Híbrido

Tanto os métodos ativos como os passivos apresentam desvantagens. Por um lado, os ativos possuem controlo limitado, e os passivos uma limitada eficiência em condições adversas. Contudo, é possível combinar as suas vantagens, conjugando os dois métodos num tratamento híbrido [24]. Estes métodos utilizam o controlo ativo para aumentar o amortecimento passivo, de modo a compensar a sua degradação em função da temperatura e/ou frequência [30].

Amortecimento com Camada de Restrição Ativa

Este tratamento (ACLD-Active Constrained Layer Damping) é composto por uma camada de viscoelástica e um piezoelétrico. Como ilustrado na Figura 2.11, o material viscoelástico encontra-se em contacto com o filme piezoelétrico. Com o objetivo de maximizar o amortecimento, o filme piezoelétrico é ativado constantemente, promovendo a deformação em corte do viscoelástico [24].

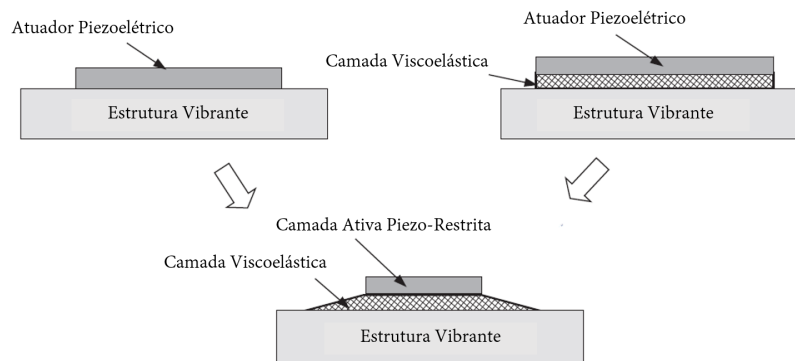


Figura 2.11: Camada ativa de restrição piezoelétrica (Adaptado de [24])

Amortecimento Ativo com Piezo-Compósitos

Este tratamento (APDC-Active Piezoelectric Damping Composites) é constituído por um conjunto de hastes piezo-cerâmicas, em contacto com uma matriz viscoelástica polimérica em toda a sua espessura.

As hastes podem ser ativadas de modo a controlar as características de amortecimento do viscoelástico, que está ligada diretamente à estrutura vibrante. Este tratamento, como ilustrado na Figura 2.12, pode ter duas configurações. Na primeira configuração, as hastes são perpendiculares à superfície, controlando assim o amortecimento em compressão.

Na segunda configuração, as hastes estão orientadas na diagonal para controlar o amortecimento por compressão e corte [24].

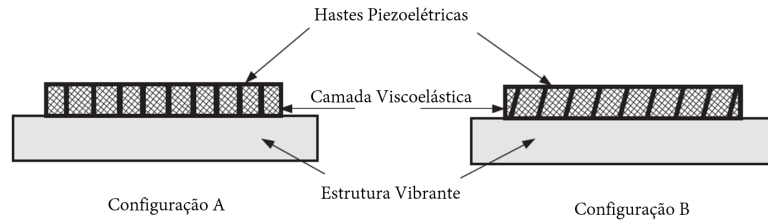


Figura 2.12: Camada ativa de restrição piezoelétrica (Adaptado de [24])

Amortecimento Eletromagnético com Compósitos

O amortecimento eletromagnético com compósitos (EMDC-Electromagnetic Damping Composites) é constituído por uma camada viscoelástica entre uma camada magnética permanente e outra eletromagnética deslocável. Neste tipo de tratamento toda a estrutura está montada na superfície do corpo vibrante, e atua como um tratamento de amortecimento inteligente. A força magnética atua comprimindo o viscoelástico, originando assim o amortecimento. Contudo, esta força magnética também interage com as vibrações transversais da estrutura, o que aumenta a tensão de corte do viscoelástico, aumentando assim o amortecimento. Este tratamento consegue inserir uma rigidez regulável na estrutura onde se encontra aplicado [24].

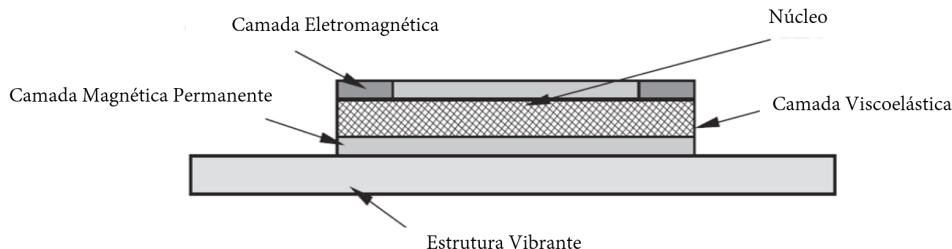


Figura 2.13: Amortecimento eletromagnético com compósitos (Adaptado de [24])

Circuito Fechado com Piezoelétricos Ativos

Este tratamento é muito semelhante ao tratamento que contém as camadas de viscoelástico ligadas ao piezoelétrico em circuito fechado, no entanto, nesta configuração existe um comutador que permite alternar entre circuito aberto e fechado. Quando se fecha o circuito o sistema funciona exatamente como o sistema de piezoelétricos em circuito fechado, dissipando a energia de vibração, na resistência inserida no circuito. Com este comutador é possível responder aos requisitos da estrutura/rede, de modo a maximizar as características de dissipação de energia instantâneas e minimizar a degradação da eficiência do viscoelástico em função da frequência [24].

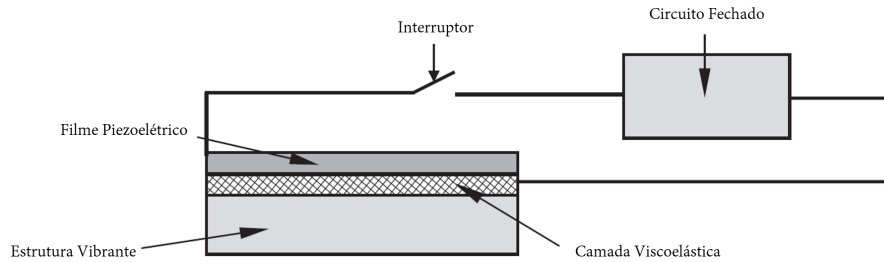


Figura 2.14: Circuito fechado com piezoelétricos ativos (Adaptado de [24])

2.6 Tratamentos de Amortecimento em Tubos

Ainda que existam diversas referências bibliográficas a tratamentos de amortecimento, são reduzidas as referentes a aplicações efetuadas em tubos.

Do ponto de vista industrial, importa que o tipo de tratamento seja possível de aplicar facilmente no tubo, independentemente do tipo de secção e complexidade do tubo.

Os materiais viscoelásticos disponíveis para aplicações deste tipo sofrem grandes danos quando sujeitos a operações de solda e conformação de curvas (operações de dobra-gem), como tal, este facto limita a forma como se vai aplicar o tratamento [27]. Se não fosse esta limitação, uma solução possível para o problema proposto seria algo semelhante a criação de E. V. THOMAS (1970), como se pode constatar na Figura 2.15 [31]. Na prática, esta solução é bastante simples e é possível que funcione muito bem em tubagens em vara.

Uma solução possível para o problema proposto é um sistema semelhante ao de J. F. STEPHENS (1957), na qual o tratamento aplicado ao tubo é facilmente amovível, como se pode constatar na Figura 2.16. O autor garante com esta invenção, uma solução fácil de aplicar e que após aplicação fica fortemente segura na estrutura [32]. Contudo, dado que a mesma não possui uma camada de restrição, a sua eficiência fica comprometida. Só para grandes espessuras de viscoelástico é que, hipoteticamente, se verificaria amortecimento no tubo, o que iria originar grandes adições de massa [27].

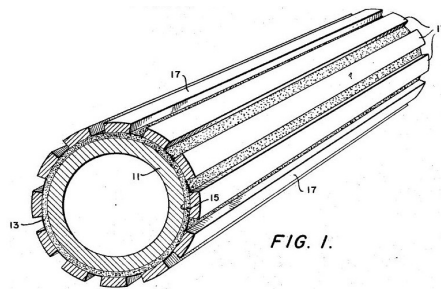


Figura 2.15: Tratamento com material viscoelástico em tubo [31]

John R. C. House (1990) também deu o seu contributo no desenvolvimento de isolamentos para tubos com a finalidade de aumentar o amortecimento dos mesmos. Este tratamento foi pensado para tubos cujas temperaturas pudessem ascender aos 150^o C.

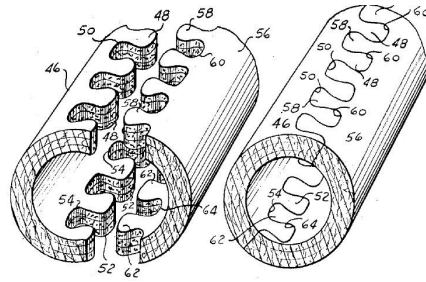


Figura 2.16: Tratamento desmontável [32]

Como se pode ver nas figuras 2.17 e 2.18, este tratamento dispõe de oito amortecedores (representados na Figura 2.17 com o número 1) dispostos circularmente a volta do tubo (7). Estes amortecedores, estão ligados ao suporte circular (2), sendo constituídos por um material viscoelástico (3) e estão ligados a duas placas de aço (4) e (5).

O suporte (2) consiste num aro de aço dividido em dois semicírculos (6), termicamente isolado do tubo (7) por uma camada rígida de 5mm (8). Como existem muitos amortecedores, é conveniente aparafusá-los ao aro (6).

As duas metades do aro (6) são fixadas ao tubo pelos grampos 9 e 10, e as chapas têm cerca de 6mm de espessura [33].

Esta solução é particularmente atrativa pois permite que a montagem seja efetuada após o tubo estar conformado e soldado.

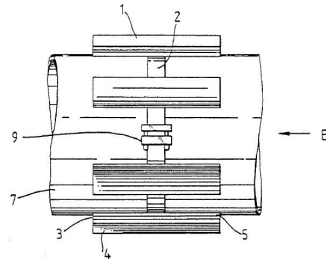


Figura 2.17: Vista lateral do tratamento de House [33]

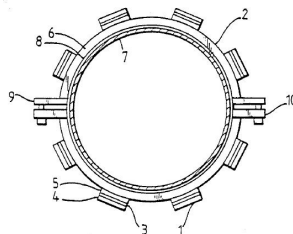


Figura 2.18: Vista da secção do tratamento de House [33]

Outra solução possível de adaptar ao problema proposto, consiste na adição de absor-

sores de vibração aos tubos. Um sistema semelhante foi simulado numa linha de escape de um automóvel e mostrou valores bastante promissores. A Figura 2.19, contém a linha de escape com os absorsores [34].

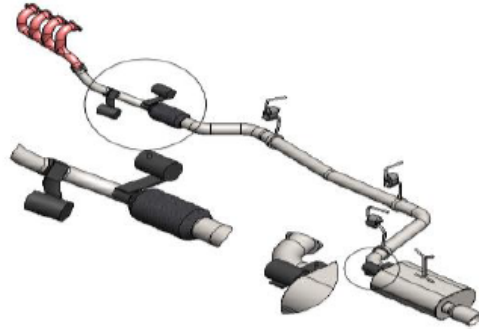


Figura 2.19: Uso de contrapesos no circuito de um sistema de escape automóvel [34]

Para além dos tratamentos referidos anteriormente, existem ainda disponíveis no mercado soluções possíveis de serem aplicadas por pulverização. Podem-se destacar os elastómeros acrílicos pulverizáveis à base de água [35], que permitem ser aplicados através de processos robotizados e são usados em painéis automóveis [36].

2.7 Tratamentos de Amortecimento em Vigas

Ao contrário do que acontece com os tubos, os estudos realizados sobre tratamentos de amortecimento em vigas são imensos.

Os tratamentos de amortecimento passivos, utilizando materiais viscoelásticos, aplicados em vigas são essencialmente de dois tipos: os tratamentos superficiais e os integrados.

Estes tratamentos adicionam pouca massa às vigas e são relativamente eficientes.

Observando estudos efetuados com esta geometria é possível quantificar alguns dos ganhos. Os tratamentos superficiais sem camada de restrição são os menos eficientes, mas chegam a fornecer cerca de 1% de amortecimento. Apesar do valor de amortecimento parecer baixo, os ganhos de amortecimento por modo, chegam a ser de quatrocentas vezes superiores aos obtidos para a mesma viga não tratada. Em tratamentos superficiais com camada de restrição chegam quase aos 2% e os ganhos de amortecimento face ao original chegam a ser quatrocentas vezes superiores.

Os tratamentos integrados são, sem margem de dúvidas, os mais eficazes e chegam a introduzir nas vigas amortecimento de 5% para alguns modos. Os ganhos de amortecimento, face ao original, atingem valores duas mil vezes superiores [12]. Estes tratamentos, para além de induzirem alterações nos valores de amortecimento, alteram também as frequências naturais do objeto, como ilustrado na Figura 2.20 [37].

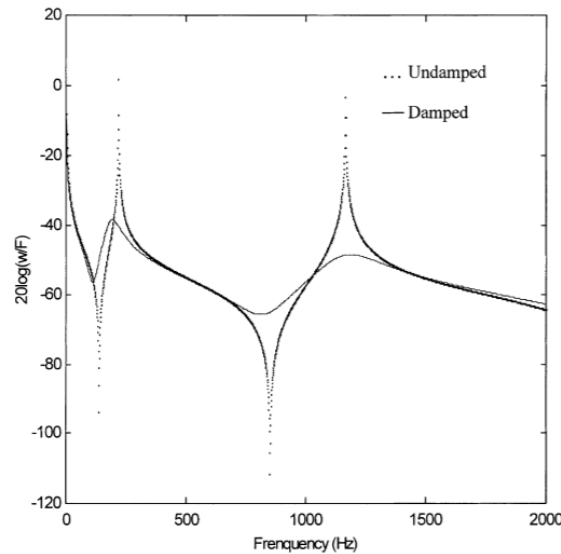


Figura 2.20: Alteração das frequências naturais [37]

2.8 Materiais Viscoelásticos

Definem-se como materiais viscoelásticos, materiais que apresentem um comportamento elástico e viscoso ao mesmo tempo. Ao induzir uma perturbação, estes conseguem voltar à sua forma inicial, mas fazem-no lentamente, opondo-se ao próximo ciclo de vibração [36]. Possuem uma grande capacidade em dissipar energia, devido à sua estrutura molecular (longas cadeias moleculares), dissipando grandes quantidades de energia sobre a forma de calor quando deformados cíclica e continuamente. Os materiais viscoelásticos são geralmente elastómeros e polímeros. Por si só, a sua eficiência estrutural é reduzida, isto é, apresentam grandes massas mas a sua resistência mecânica é, no geral baixa, necessitando assim de serem integrados sob a forma de tratamentos dissipativos, em componentes constituídos por materiais com elevada rigidez [25].

O comportamento destes materiais é altamente influenciado pela temperatura e frequência a que são submetidos. Como tal, quando se dimensionam materiais viscoelásticos é fundamental ter em atenção estas duas variáveis [27].

2.8.1 Modelos Clássicos que Caracterizam Materiais Viscoelásticos

Existem pelo menos três modelos clássicos que caracterizam os materiais viscoelásticos, sendo eles os modelos de Maxwell, Kelvin-Voigt e Poynting-Thomson. Nestes modelos, representados na Figura 2.21, a caracterização do viscoelástico é descrita através de uma série de combinações de amortecedores viscosos (que simulam o comportamento viscoso do material) e molas (que simulam o comportamento elástico), dispondo-os em paralelo, série ou ambos.

2.8.2 Efeito da Temperatura nos Materiais Viscoelásticos

A temperatura influencia a capacidade de amortecimento e a rigidez do material viscoelástico. Como ilustrado na Figura 2.22, existem três regiões distintas separadas por linhas

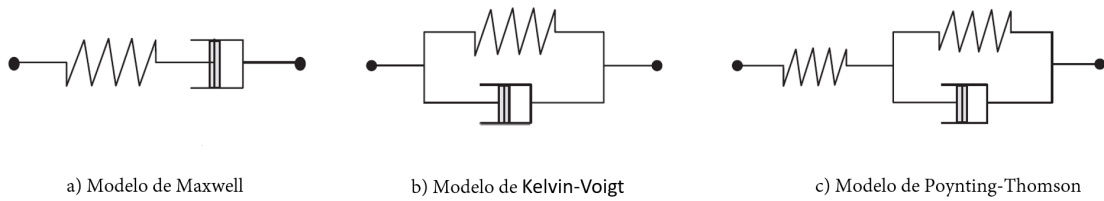


Figura 2.21: Modelos caracterizadores de materiais viscoelásticos

a tracejado. Estas regiões são denominadas, respetivamente, de região vítrea, região de transição e região elástica.

A baixas temperaturas, o material encontra-se na região vítrea, que é quando oferece maior rigidez, e é onde apresenta o maior valor para o módulo de armazenamento. Conforme se aumenta a temperatura, o módulo de armazenamento diminui. Contudo, o fator de perda começa a aumentar.

Na segunda zona, a região de transição, o viscoelástico amolece, o módulo de armazenamento diminui à medida que a temperatura aumenta. É nesta zona de transição que o fator de perda atinge o seu pico.

Para temperaturas mais elevadas, o material entra na região elástica onde se comporta como uma borracha muito macia. Aqui o material mostra baixa rigidez e valores dos módulos de armazenamento e de perda igualmente baixos [24].

Assim, conclui-se que o viscoelástico deve ser escolhido de modo a operar perto do pico do seu fator de perda, de modo a fornecer um bom amortecimento. Contudo, é necessário considerar que o módulo de armazenamento decresce nesta região.

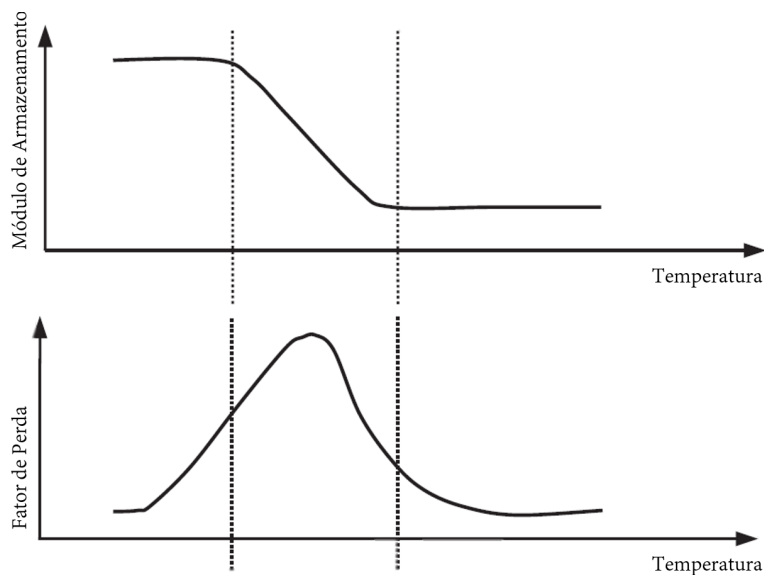


Figura 2.22: Variação do módulo de armazenamento e do fator de perda em função da temperatura (Adaptado de [24])

2.8.3 Efeito da Frequências nos Materiais Viscoelásticos

Tal como a temperatura influencia a capacidade de amortecimento e rigidez do viscoelástico, a frequência também o faz. Na Figura 2.23 encontram-se as três regiões, sendo estas, a vítrea, de transição e elástica.

Quando é submetido a baixas frequências, na zona vítrea, o material apresenta baixa rigidez e um fator de perda igualmente baixo. É na zona de transição que se atinge o pico máximo do fator de perda, e que o seu módulo de armazenamento aumenta linearmente com a frequência. Quando submetido a altas frequências, oferece uma rigidez mais elevada e um fator de perda semelhante ao da zona vítrea [24].

Estas oscilações na rigidez e amortecimento do material devem-se ao reagrupamento das cadeias moleculares, para atingirem uma nova posição de equilíbrio, após ter sido imposta uma deformação. Quando se induzem perturbações cíclicas do tipo harmónico, as cadeias moleculares reagem em sintonia com a excitação, dado que atingem um novo estado de equilíbrio dinâmico. Deste modo, quando se submete o viscoelástico a uma frequência baixa, o material apresenta uma rigidez reduzida, mas quando é submetido a uma frequência alta a sua rigidez é igualmente elevada [26].

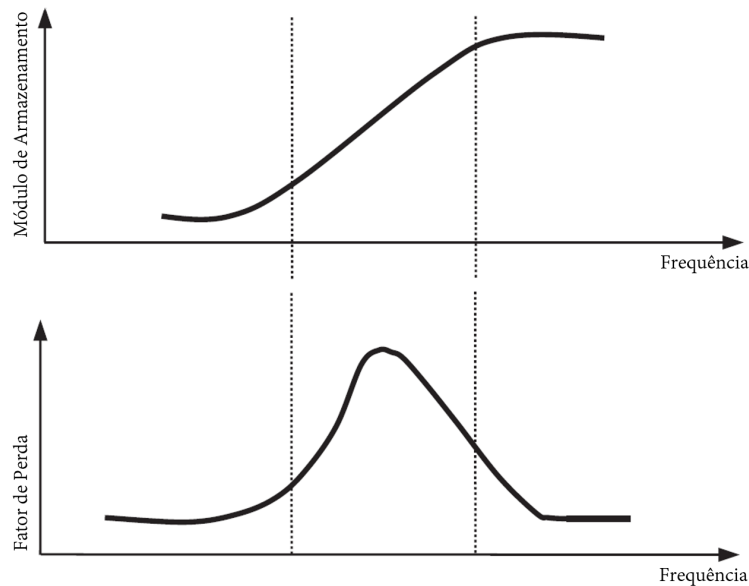


Figura 2.23: Variação do módulo de armazenamento e do fator de perda em função da frequência (Adaptado de [24])

2.8.4 Módulo Complexo

O módulo complexo relaciona o campo de deformações (ϵ) com o campo de tensões (σ) a que um material viscoelástico está sujeito, em regime harmónico, como se demonstra na Equação 2.2 [12].

$$\sigma = \bar{E} * \epsilon \quad (2.2)$$

O módulo complexo extensional (\bar{E}), é descrito na Equação 2.3.

$$\bar{E}(\omega, \Gamma) = E'(\omega, \Gamma) + jE''(\omega, \Gamma) \quad (2.3)$$

A componente real do módulo complexo, E' , representa a capacidade de armazenamento de energia de deformação material e denomina-se como módulo de ganho. A componente imaginária E'' , designa-se como módulo de perda e define a capacidade de dissipação do material viscoelástico. A razão entre a componente imaginária (módulo de perda) e o módulo de armazenamento é denominada, por fator de perda. Sintetizando, o módulo complexo permite representar o amortecimento viscoelástico e caracterizar o efeito viscoelástico em regime estacionário harmónico [12].

2.9 MSE-Modal Strain Energy

Este método, proposto por Johnson e Kienholz, torna possível obter uma aproximação ao fator de perda modal do sistema amortecido, para cada um dos modos naturais, através da relação entre a energia dissipada e a energia de deformação do sistema não amortecido, e esta relação está representada na Equação 2.4 [38].

$$\tilde{\eta}_r = \frac{\sum_{K=1}^n \eta_{kr} \Pi_{kr}}{\sum_{K=1}^n \Pi_{kr}}$$

(2.4)

Os termos η_{kr} e Π_{kr} , representam, respetivamente, o fator de perda de cada um dos materiais constituintes k e a respetiva energia de deformação para o modo de vibração de ordem r.

Utilizou-se este método ligeiramente modificado pois, o objetivo não era ter uma comparação quantitativa, mas sim qualitativa.

Para calcular o amortecimento, recorreu-se ao Femap, de modo a obter o valor da energia contida em cada elemento, e trataram-se os dados em Matlab, obtendo assim o valor do fator de perda para cada modo natural.

Capítulo 3

Metodologia

Nesta secção será descrita toda a metodologia utilizada nos ensaios de vibração realizados e análise de dados.

Com o objetivo de obter dados relativos ao amortecimento dos objetos em estudo, iniciou-se o procedimento com a análise dos objetos sem nenhum tratamento. Nesta análise foram efetuados ensaios, de modo a obter as frequências naturais, modos naturais e respetivos fatores de amortecimento modal. Para analisar a eficácia dos tratamentos posteriormente aplicados, foram realizadas novas análises de modo a determinar as alterações relativas a estas características modais de referência.

3.1 Equipamento Utilizado no Ensaio Experimental

A análise modal experimental inicia-se pela determinação das funções de resposta em frequência. Para calcular estas funções é necessária uma maneira de excitar o objeto de forma controlada, medindo, em simultâneo, a força aplicada sobre o mesmo e a resposta a esta excitação.

Nesta dissertação foram realizados dois tipos de testes: o teste de impacto e o teste com um excitador eletrodinâmico alimentado com ruído branco, na gama de frequências de interesse.

3.1.1 Metodologia de análise através de um teste de impacto

Tal como descrito anteriormente, numa análise modal experimental é necessário excitar o objeto e medir a resposta a esta excitação. No teste de impacto, tal como o nome indica, é utilizado um impacto para excitar o item em estudo. Nesta dissertação utilizou-se um martelo de impacto da marca Kistler, modelo 9722A2000, semelhante ao da Figura 3.1.

Para medir a resposta ao impacto aplicado neste teste, foi utilizado um acelerómetro da marca Bruel & Kjaer, modelo 4507. Tanto o acelerómetro como o martelo de impacto são conectados ao analisador espectral, Spectral Dynamics Siglab 2042, que providencia os dados necessários para o cálculo da função de resposta em frequência. Na Figura 3.2, encontra-se representado um esquema simples de todo o *setup* necessário para efetuar o teste. De modo a comparar os resultados numéricos com os experimentais, consideraram-se condições de fronteira livre em ambos os casos. Neste ensaio através de um teste de impacto, as condições de fronteira foram aplicadas apoiando os objetos em estudo sobre uma espuma macia, como ilustrado na Figura 3.3.



Figura 3.1: Martelo de impacto instrumentado e acelerómetro [39]

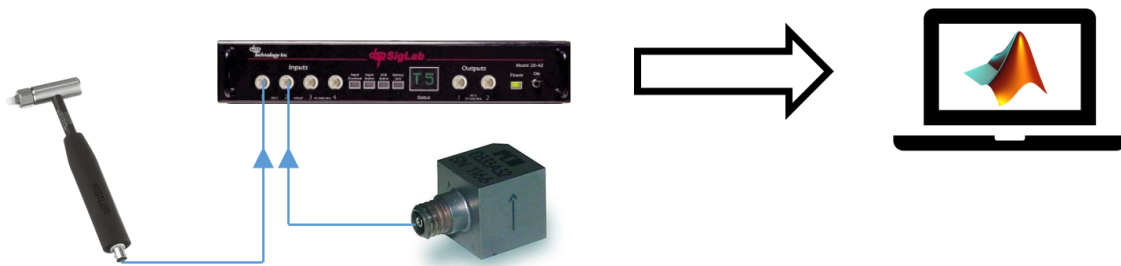


Figura 3.2: Esquema do teste de impacto

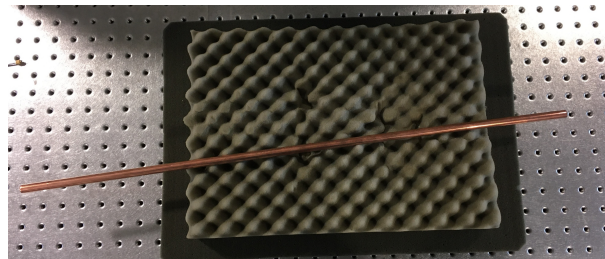


Figura 3.3: Espuma necessária aos testes de impacto

3.1.2 Metodologia de análise através de um teste com excitador eletrodinâmico

O teste com o excitador eletromagnético, diferencia-se do teste de impacto na medida em que o objeto é excitado de maneira diferente. Neste caso, o excitador é conectado ao corpo em estudo introduzindo um carregamento dinâmico, gerado por um gerador de funções, como ilustrado na Figura 3.4. Neste caso a geração do sinal aplicado na entrada do amplificador do excitador electrodinâmico é realizada por um gerador de funções, que nesta montagem experimental se encontra integrado no analisador espectral utilizado (DSPT Siglab 20-42). Difere também na forma como é medida a resposta do sistema, uma vez que neste cenário se recorre a um vibrómetro, da marca Polytec, modelo OFV-505, para medir a velocidade do objeto, como ilustrado nas figuras 3.5 e 3.6. Este laser

é conectado ao decodificador OFV-5000 que decodifica as leituras do laser em tempo real. Este equipamento permite uma ampla gama de decodificadores de deslocamento e velocidade do ponto medido [40].

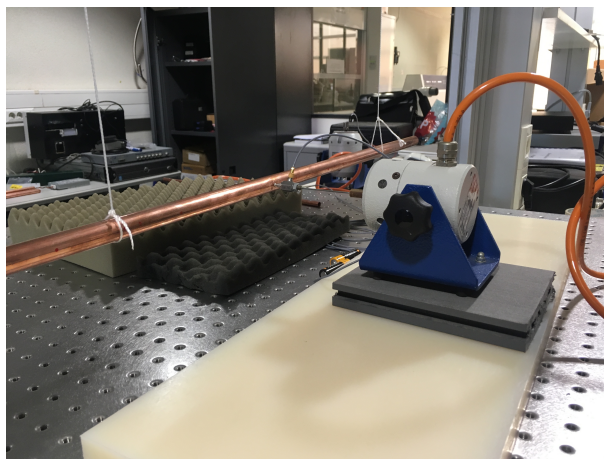


Figura 3.4: Excitador eletrodinâmico



Figura 3.5: Vibrômetro Laser

Este teste realizou-se em regime de vibração livre e foi utilizado um excitador, da marca Tira, modelo s503, num intervalo de frequências de 0 até 2000 Hz. suspendendo os tubos

Os objetos de análise são suspensos com dois fios inextensíveis, nos dois pontos nodais do primeiro modo de flexão, a partir de um pórtico rígido, como se pode verificar na Figura 3.7. Conectado ao excitador está um transdutor de força, para medir a força inserida no objeto, e para conectar este transdutor ao objeto em estudo, utilizou-se um parafuso com rosca M2. Quando se analisam os tubos em cobre é necessário fazer uma ligeira incisão na sua superfície, de modo a que a cabeça do parafuso assente na totalidade. Posteriormente, cola-se a cabeça do parafuso ao tubo, e aparafusa-se o mesmo à célula de carga, tal como se pode verificar na Figura 3.8.

Dado que a superfície dos objetos em estudo não reflete o laser, para obter uma leitura



Figura 3.6: Suporte do Vibrômetro Laser

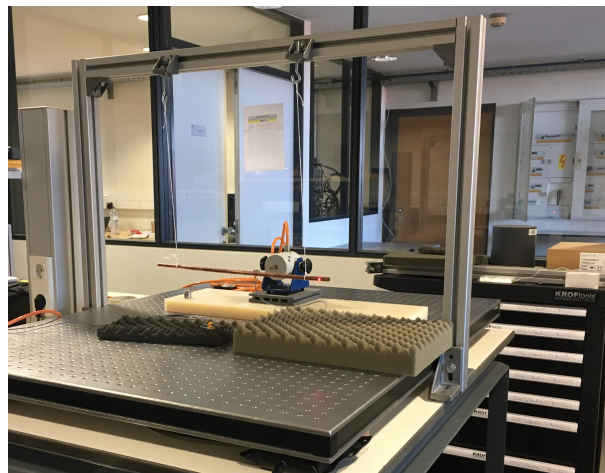


Figura 3.7: Tubo suspenso



Figura 3.8: Parafuso colado

correta da velocidade do objeto é necessário aplicar sobre o mesmo um adesivo refletor,

tal como se pode observar na Figura 3.9. A função deste adesivo é simplesmente refletir o sinal laser que nele incide.

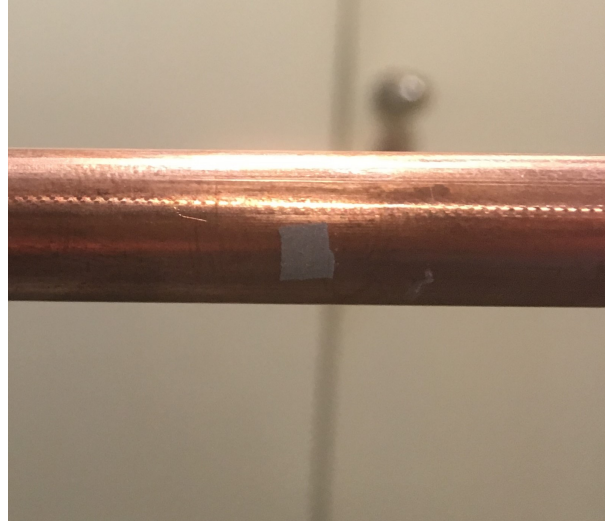


Figura 3.9: Adesivo refletor

Tal como no teste de impacto, todos os dados oriundos deste teste serão posteriormente tratados em Matlab e MScope. É possível observar um esquema desta montagem experimental na Figura 3.10.

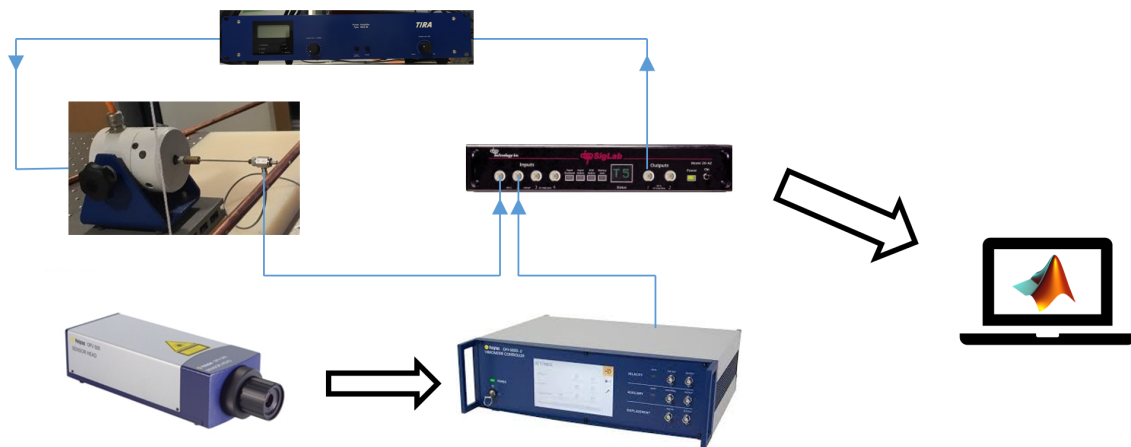


Figura 3.10: Esquema do teste com excitador eletrodinâmico

3.2 Tratamento posterior de dados

3.2.1 Tratamento dos Dados em Matlab

Após se realizarem os ensaios de vibrações, foi necessário tratar os dados para efetuar assim, uma análise modal completa. Inicialmente, utilizou-se o Matlab para efetuar este tratamento, através da conversão de resultados do formato fornecido pelo analisador para

o formato necessário para o programa de identificação modal. Uma vez que os ficheiros eram gravados em *.vna, era necessário convertê-los em *.mat para poder utilizá-los. Para se aceder ao gráfico da função de resposta frequência é necessário aceder ao vetor SLM, para indexar o vetor de frequência e a função de frequência. Depois, executando o comando *semilogy* era possível obter o gráfico da função FRF (magnitude) como se pode observar na Figura 3.11.

Todas linhas de código necessárias para executar este processo encontram-se representadas a seguir.

```
load tubo1701.vna -mat
f=SLM.fdxvec;
frf=SLM.xcmeas(5).xfer;
semilogy(f,abs(frf));
```

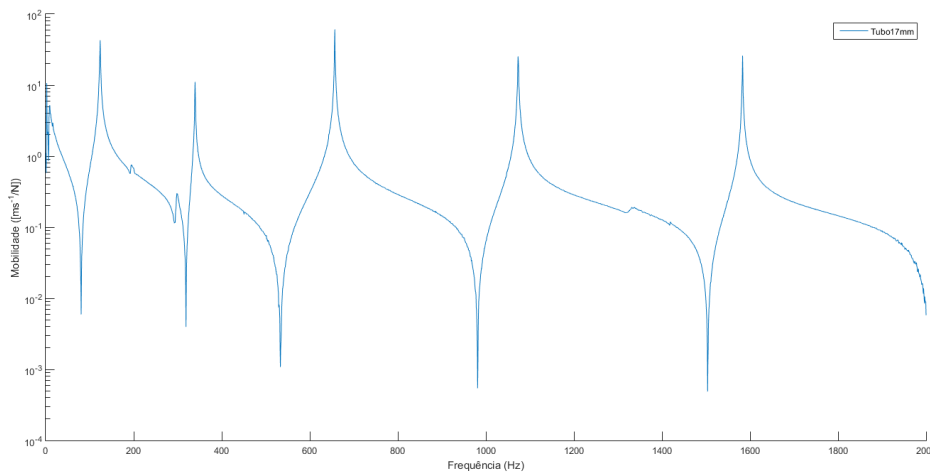


Figura 3.11: Exemplo de uma FRF

Com as FRF era possível identificar as frequências naturais dos objetos em estudo.

3.2.2 Pós-processamento dos Dados Obtidos

Apesar de ser possível visualizar as funções FRF dos tubos com as linhas de código representadas na subsecção 3.2.1, estes gráficos não permitiam ter um valor quantitativo de amortecimento, apenas qualitativo. Então, para poder quantificar aproximadamente o valor de amortecimento, tanto dos objetos sem tratamento, como dos objetos com tratamentos aplicados, foi necessário recorrer ao método *Circle-fit*.

Uma vez que a função de resposta em frequência extraída era do tipo mobilidade, foi necessário convertê-la para receptância para, posteriormente, poder ser utilizado o *Circle-fit*. Para isto, integrava-se a função FRF de mobilidade para receptância. Com a análise da função de receptância já era possível obter valores médios para as frequências naturais, o fator de perda (amortecimento) e o desvio padrão.

Apesar deste método ser simples de utilizar, mostrou-se pouco fiável nos resultados obtidos pois estes apresentavam alguma variação, como consequência, estes não serão apresentados nesta dissertação.

3.2.3 Pós-processamento com o MEscope

O MEscope é um conjunto de programas que permitem a análise de problemas relacionados com ruído e vibrações. Este programa permite a aquisição de dados em tempo real e o pós-processamento de dados obtidos anteriormente.

De todos os pacotes que o MEscope oferece, o mais utilizado foi o VES-4600, que permitiu a identificação modal.

Utilizando o MEscope é possível identificar tanto frequências naturais, como o fator de amortecimento modal em cada uma destas frequências. Era ainda possível visualizar a forma modal de cada modo natural do objeto, modelando a sua geometria [41].

Contudo, este processo não era direto. Para conseguir fazer o pós-processamento no MEscope, os dados tinham que ser convertidos de .vna para .mat para poderem ser acedidos em Matlab, onde, os ficheiros eram convertidos de .mat para *universal files*. A função de mobilidade obtida inicialmente era convertida para função de aceleração.

Na interface do MEscope tinham que ser inseridas as dimensões relativas do objeto e ainda as posições dos pontos onde eram feitas as leituras, ou seja, tinha que se identificar a posição dos adesivos dispostos na Figura 3.9. Após se terem correlacionados os pontos de leitura com as posições, era necessário usar o comando *curve fitting* para o *software* proceder à correta identificação das frequências naturais, correspondente fator de amortecimento modal em cada ponto e os resíduos dos modos naturais.

Para se usar corretamente o comando *curve fitting*, eram necessários 4 passos: determinar o número de modos, estimar as frequências naturais, estimar os resíduos modais e por fim guardar os parâmetros na tabela das formas naturais [42].

Para determinar o número de modos, dado que os testes experimentais realizados apenas tinham um ponto de excitação, são considerados ensaios mono-referência podendo selecionar entre dois métodos: o *Complex Mode Indicator Function* (CMIF) ou o *Multivariate Mode Indicator Function* (MMIF), e em cada modo, podia utilizar-se a parte real, imaginária ou a magnitude. Nesta dissertação utilizou-se o método CMIF e utilizou-se a parte imaginária para calcular os modos, pois esta era a mais adequada dado que a FRF era do tipo aceleração [43].

3.3 Simulação no Femap/Nx Nastran

Como referido anteriormente, para além da análise modal experimental, foram também realizadas análises recorrendo à simulação numérica. A simulação numérica foi efetuada utilizando o programa Femap, com o NX Nastran. Neste programa é necessário introduzir as características dos materiais, as condições de fronteira e a geometria dos objetos.

Na simulação usaram-se elementos de placa QUAD4, cuja formulação assenta sobre a teoria de Mindlin-Reissner, para representar a viga, o tubo e a camada de restrição. A camada viscoelástica foi representada pelo elemento hexaédrico de 8 nós HEXA8.

Nas características dos materiais é necessário inserir o módulo de *Young*, coeficiente de *Poisson* e a densidade do material.

Usaram-se condições de fronteira livre em todas as simulações efetuadas.

3.3.1 Propriedades Mecânicas dos Tubos de Cobre

Para efetuar a simulação no programa eram necessárias as propriedades geométricas e materiais do objeto. As propriedades geométricas foram obtidas medindo diretamente na peça. Contudo, as propriedades materiais necessitavam de cálculos indiretos.

Para obter a densidade do material utilizou-se uma balança digital, como se pode observar na Figura 3.12 e dividiu-se a massa obtida pelo volume de cada tubo.



Figura 3.12: Avaliação da massa do tubo

O módulo de elasticidade podia ser obtido com um ensaio de tração e o mesmo foi realizado como se pode verificar na Figura 3.13. Contudo, como representado na Figura 3.14, o provete partiu na zona da agarrá, ou seja, nem os valores obtidos com o ensaio eram plausíveis, nem o ensaio podia ser considerado válido.

Tendo em conta o insucesso do ensaio de tração, nas simulações utilizaram-se valores do módulo de elasticidade e do coeficiente de *Poisson* de ligas semelhantes [44]. Apenas se usou a densidade medida experimentalmente. As propriedades utilizadas nas simulações encontram-se na Tabela 3.1.

Densidade	Módulo de Elasticidade	Coefficiente de <i>Poisson</i>
7656 Kg/m ³	120 GPa	0,34



Figura 3.13: Ensaio de tração

3.3.2 Propriedades Mecânicas dos Restantes Materiais

Dada a escassez das vigas de alumínio, não se realizaram ensaios de tração nas mesmas, pois estes são destrutivos. Utilizou-se então nas simulações das vigas, propriedades mecânicas de ligas de alumínio semelhantes e as mesmas encontram-se na Tabela 3.2 [45].

Tabela 3.2: Propriedades do Alumínio

Densidade	Módulo de Elasticidade	Coefficiente de <i>Poisson</i>
2698 Kg/m ³	68,9 GPa	0,34

Para os restantes materiais utilizados também não se realizaram ensaios de tração. Para todas as análises numéricas onde se simulou a utilização de materiais viscoelásticos, utilizaram-se as propriedades da Tabela 3.3, identificadas a partir da análise de vários trabalhos publicados.

Tabela 3.3: Propriedades do Viscoelástico

Densidade	Módulo de Elasticidade	Coefficiente de <i>Poisson</i>
1000 Kg/m ³	3 MPa	0,45



Figura 3.14: Provete partido na zona da agarra

3.3.3 MSE Utilizando o Femap

O MSE adaptado permite através de um cálculo relativamente simples obter razões de dissipação de energia. O Femap possui comandos que permitem calcular a energia de cada elemento após se efetuar uma análise numérica. É possível, com o programa, observar qual dos elementos continha o maior e o menor valor de energia de deformação modal. Recorrendo ao Femap conseguia-se ainda, obter uma distribuição da energia de todos os elementos segundo uma paleta de cores como se ilustra na Figura 3.15. Esta ferramenta é bastante útil para avaliar a eficiência de tratamentos de amortecimento, contudo, não permite obter valores quantitativos relativos à sua eficiência. Devido a este facto, é necessário recorrer ao MSE.

É possível calcular as razões de energia com o Femap, no entanto, este processo não é direto e é necessário recorrer ao Matlab ou a outro programa idêntico para realizar os cálculos.

São necessários alguns passos para obter os valores do fator de perda. Começa-se por fazer uma análise numérica para obter os dados relativos às frequências naturais e à energia dos elementos. Posteriormente, é necessário exportar estes dados, e o Femap permite executar este passo, oferecendo diversos tipos de ficheiros. Utilizou-se o ficheiro .txt com o intuito de aceder ao mesmo em Matlab. Estes blocos de notas continham um cabeçalho que identificava a frequência natural, e debaixo deste estavam duas colunas, sendo a primeira referente ao número do elemento e a segunda, relativa à energia que este continha, cujas dimensões dependiam diretamente do número de elementos. No Matlab, criou-se uma rotina que reconhecia alguns dos dados referentes a este cabeçalho, e realizava o somatório da energia contida nos elementos, como representado nas linhas de código dispostas no Anexo F. De modo a simplificar todo o processo, por cada análise

foram extraídos dois ficheiros, um que contém a energia dos elementos viscoelásticos e o outro contém a energia de todos os elementos.

Este procedimento encontra-se descrito pormenorizadamente no Anexo F.

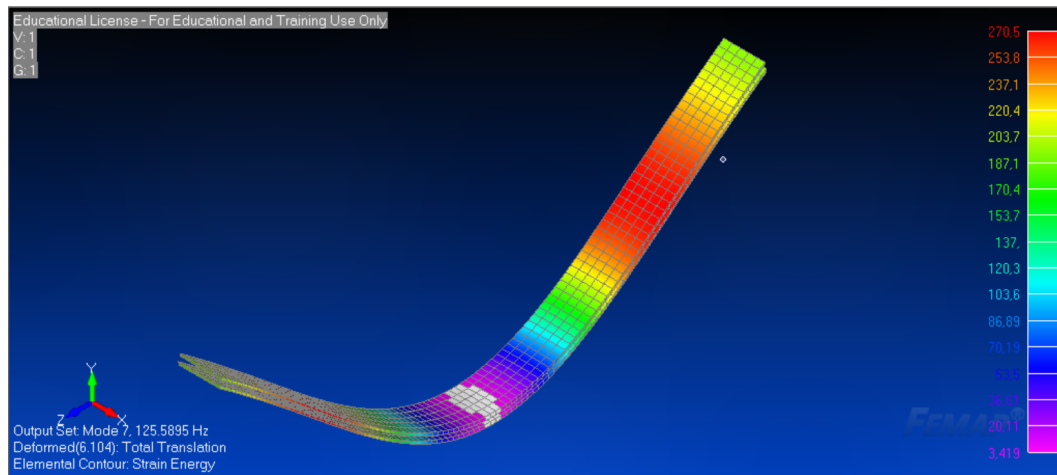


Figura 3.15: Distribuição da energia de deformação

Capítulo 4

Análise

4.1 Análise das Vigas

Devido ao facto de as vigas apresentarem uma geometria mais simples e já que a bibliografia indica bons resultados de amortecimento para este objeto tratado [12] [26], decidiu-se começar toda a investigação por esta geometria.

Inicialmente, começou-se por obter alguns dados inerentes aos diferentes tipos de vigas existentes, nomeadamente, a sua massa e as suas dimensões. Estes dados podem ser consultados na Tabela 4.1.

De modo a facilitar a discussão de resultados, arbitrou-se um sistema de eixos, como ilustrado na Figura 4.1.

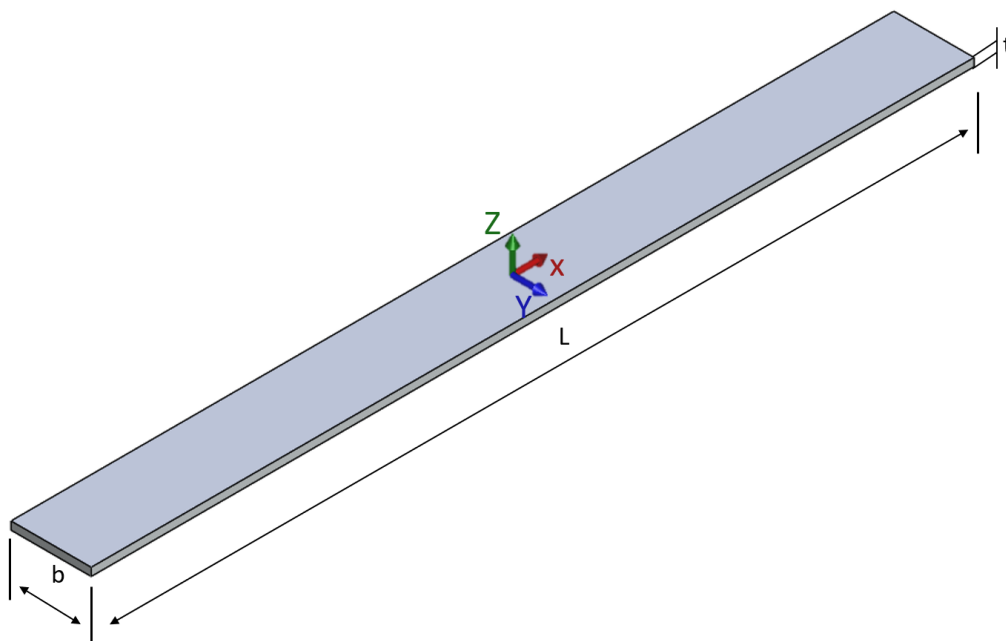


Figura 4.1: Convenção de eixos adotada nas vigas

Tabela 4.1: Características das vigas

Características	Viga 1	Viga 2
Comprimento (L) (mm)	330	330
Largura (b) (mm)	25	30
Espessura (t) (mm)	2	3
Massa (g)	45,93	76,85

4.1.1 Vigas sem Tratamento

Iniciou-se o estudo com as vigas sem tratamento de modo a poder ter uma referência para comparação quando, posteriormente, se aplicarem os tratamentos. Pretende-se verificar as modificações introduzidas tanto nas frequências naturais, como no amortecimento obtido.

Estudo Numérico

Com recurso ao Femap, modelaram-se as vigas e obtiveram-se então os valores das frequências naturais. Todas as simulações foram realizadas na ausência de condições de fronteira, ou seja, simulando as condições de vibração dum corpo livre no espaço.

As duas vigas foram simuladas utilizando uma malha com quinhentos cada uma delas e elementos de placa. Utilizou-se o alumínio com as propriedades definidas na Tabela 3.2. Nas tabelas 4.2 e 4.3, encontram-se os modos naturais em função das frequências naturais para os dois tipos de vigas. Nas figuras 4.2 e 4.3 encontram-se representados os modos naturais para a viga de 25 e 30mm, respetivamente. De referir que o 6^o modo natural está representado pela vista superior e todos os outros estão representados pela vista lateral.

Tabela 4.2: Resultados numéricos para a viga de 25mm

Modo Natural	Frequência Natural(Hz)	Forma Modal
1 ^o	94	Flexão 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	262	Flexão 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	514	Flexão 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	708	Torção 1 ^a ordem sobre OX
5 ^o	852	Flexão 4 ^a ordem plano OXZ
6 ^o	1162	Flexão 1 ^a ordem plano OXY
7 ^o	1274	Flexão 5 ^a ordem plano OXZ
8 ^o	1422	Torção 2 ^a ordem sobre OX

Estudo Experimental

Após a simulação numérica aplicando o MEF, realizaram-se os ensaios de vibração nas vigas. Para tal, suspendeu-se a viga no pórtico, e como descrito na metodologia, colou-se o parafuso que permite conectar o objeto ao transdutor de força e colaram-se os autocolantes refletores, como se pode verificar na Figura 4.4.

Nas tabelas 4.4 e 4.5 encontram-se os valores das frequências naturais e os valores de amortecimento modal correspondente (fator de perda modal (%)).

Tabela 4.3: Resultados numéricos para a viga de 30mm

Modo Natural	Frequência Natural(Hz)	Forma Modal
1 ^o	142	Flexão 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	393	Flexão 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	771	Flexão 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	881	Torção 1 ^a ordem sobre OX
5 ^o	1278	Flexão 4 ^a ordem plano OXZ
6 ^o	1383	Flexão 1 ^a ordem plano OXY
7 ^o	1774	Torção 2 ^a ordem sobre OX
8 ^o	1912	Flexão 5 ^a ordem plano OXZ

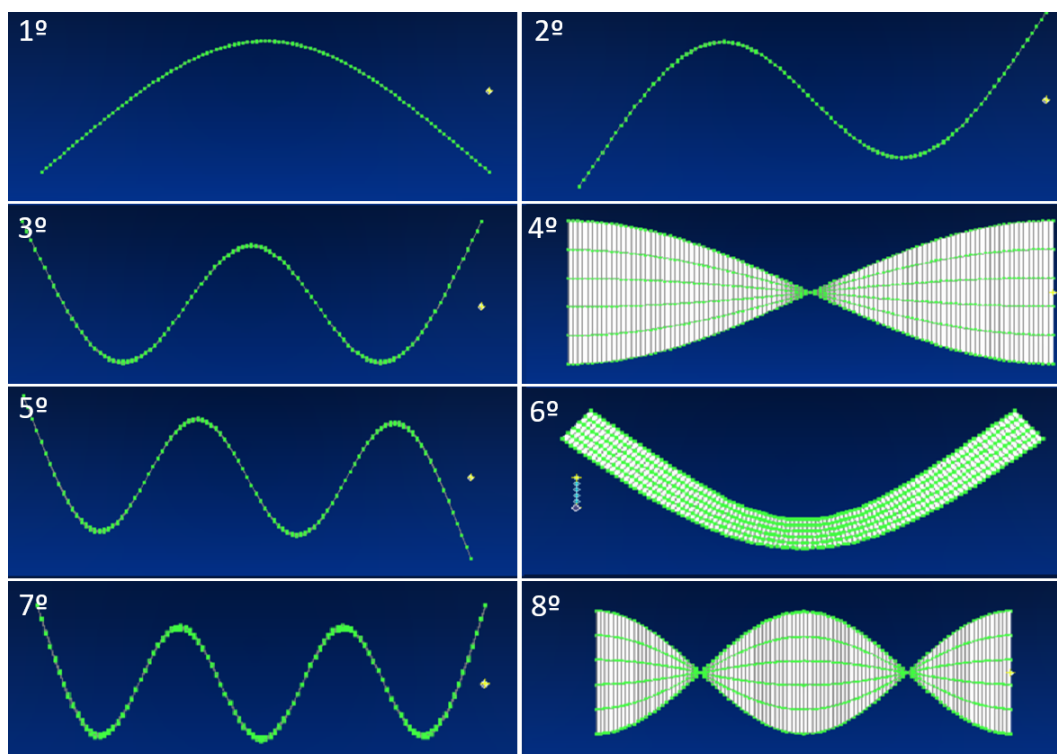


Figura 4.2: Formas modais numéricas para a viga de 25mm

Tabela 4.4: Amortecimento para a viga de 25mm

Modo Natural	Frequência Natural(Hz)	Amortecimento(%)	Forma Modal
1 ^o	96	0,41	Flexão 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	260	0,33	Flexão 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	535	0,16	Flexão 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	851	0,12	Flexão 4 ^a ordem plano OXZ

De referir que, nos ensaios experimentais realizados tanto à viga de 25mm como à de 30mm, os modos naturais de torção são omitidos. Contudo, consultando a magnitude da função FRF para ambas as barras, disponíveis nos anexos A.1 e A.2 do documento, é possível verificar que existe uma pequena evidência por volta dos 750 Hz na FRF da viga

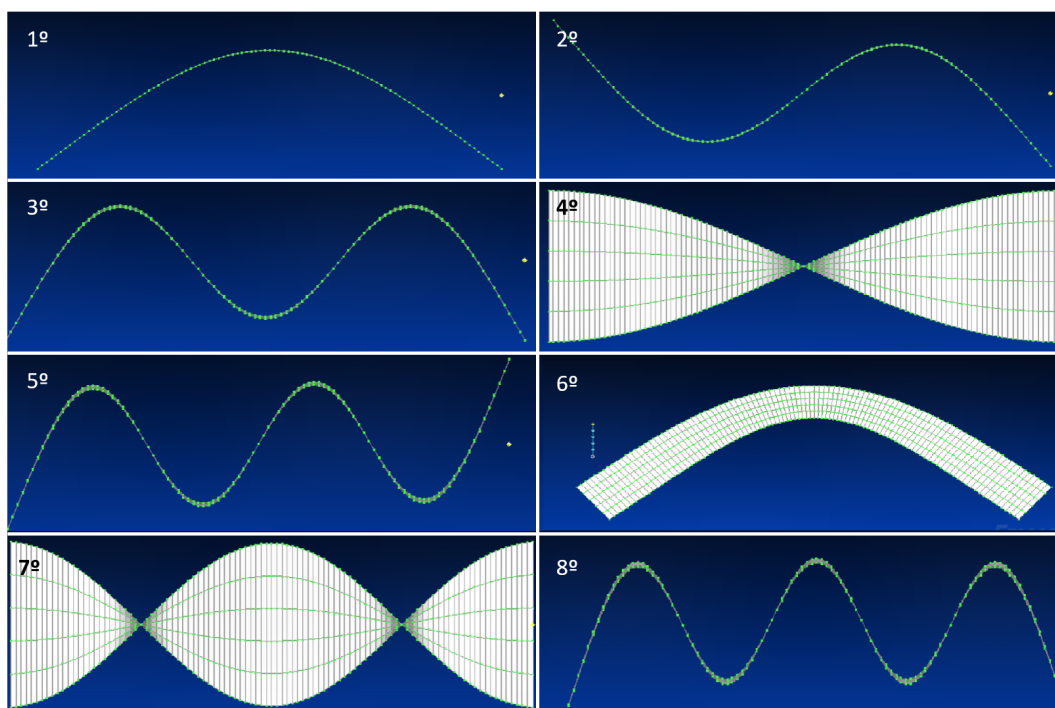


Figura 4.3: Formas modais numéricas para a viga de 30mm

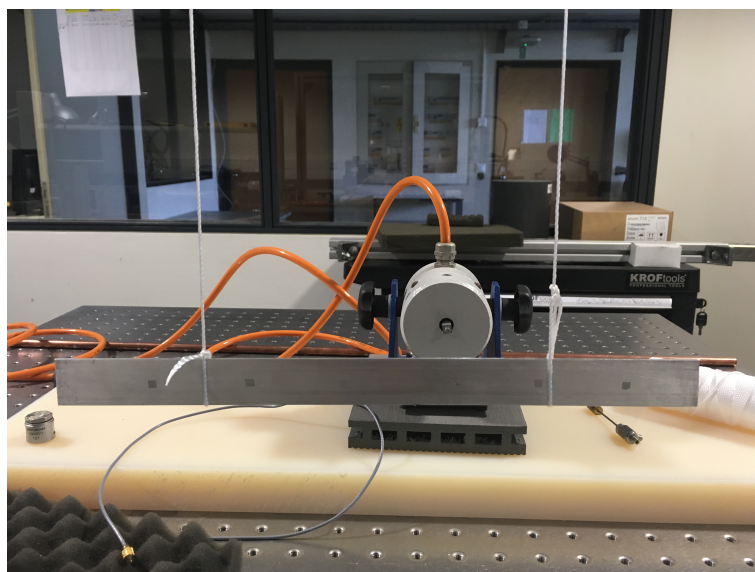


Figura 4.4: Metodologia de ensaio de vibração livre da viga

de 25mm e por volta dos 900 Hz na FRF da viga de 30mm que pode indicar o aparecimento deste modo natural. No entanto, com este tipo de medição, é impossível identificar este modo para ambas as barras, pois os autocolantes refletos estão posicionados, na medida que o erro humano permite, ao centro da viga, a todo o seu comprimento, no plano OXY, como se de uma linha se tratasse.

Tabela 4.5: Amortecimento para a viga de 30mm

Modo Natural	Frequência Natural(Hz)	Amortecimento(%)	Forma Modal
1 ^o	137	0,20	Flexão 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	377	0,03	Flexão 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	752	0,07	Flexão 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	1230	0,37	Flexão 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1840	0,13	Flexão 5 ^a ordem plano OXZ

4.1.2 Vigas com Tratamento

Foram cedidos por parte da Bosch vários tratamentos, para aplicar tanto nas vigas como nos tubos. Nos vários tratamentos fornecidos, encontravam-se dois tratamentos com camada de restrição da 3M, várias mangas termorretráteis da HellermannTyton e uma manga termorretrátil da cellpack [46]. Nos tratamentos da 3M, uma das fitas fornecida foi a fita de amortecimento 434 (3M Vibration Damping Tape 434). Esta é constituída por uma camada viscoelástica polimérica de 0,05mm e a camada de restrição é de alumínio com 0,14mm [47]. A outra fita não estava identificada. Este tratamento será referenciado nesta dissertação como tratamento 3M mais espesso, dada a sua espessura ser de aproximadamente 2,75mm, sendo 2,7mm referentes ao viscoelástico e 0,05mm referente ao alumínio, sendo possível ver a sua constituição na Figura 4.5.



Figura 4.5: Tratamento 3M mais espesso

Dentro dos produtos da HellermannTyton, foram fornecidas mangas termorretráteis com as referências, SE28 [48], Tan 32 [49], HA67 [50] e EPS 300 [51]. As fichas técnicas das mesmas encontram-se indicadas nas referências deste documento. Foi ainda utilizado nesta dissertação, um tratamento constituído por aglomerado de cortiça e alumínio como camada de restrição.

Estudo Numérico

Neste estudo numérico utilizaram-se dimensões aproximadas dos materiais aplicados. Estimou-se o fator de perda com recurso ao MSE adaptado de modo a poder estabelecer uma comparação de qual o tratamento mais eficaz, e também da variação da eficiência deste em função da forma modal/frequência natural. Assim sendo, começou-se por simular o tratamento da 3M 434, aplicado à viga 1, a de 25mm, cujos resultados se encontram apresentados na Tabela 4.6. Posteriormente, simulou-se o outro tratamento da 3M, o de maior espessura, na mesma viga, cujos resultados se encontram apresentados na Tabela 4.7. Em ambos os ensaios, mantiveram-se as propriedades do viscoelástico e da camada de restrição de alumínio, alterando se apenas a espessura das camadas. Nas figuras 4.6 e 4.7 encontram-se, respetivamente, as formas modais. Nestas figuras os elementos do viscoelástico contêm o contorno colorido.

Nas simulações realizadas com mangas termorretráteis verificou-se que os elementos viscoelásticos não continham energia de deformação modal evidente, como tal, não havia amortecimento significativo. Os modos naturais possuem a mesma ordem que os da Figura 4.6, com a diferença de que os elementos de viscoelástico não continham energia de deformação e como tal encontravam-se representados com a cor branca.

Tabela 4.6: Resultados numéricos para a viga de 25mm com tratamento 3M 434

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Fator de Perda (%)	Forma Modal
1 ^o	111	1,52	Flexão 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	299	5,09	Flexão 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	571	8,20	Flexão 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	700	8,49	Torção 1 ^a ordem sobre OX
5 ^o	919	10,16	Flexão 4 ^a ordem plano OXZ
6 ^o	1153	0,00	Flexão 1 ^a ordem plano OXY
7 ^o	1342	10,93	Flexão 5 ^a ordem plano OXZ
8 ^o	1404	8,21	Torção 2 ^a ordem sobre OX
9 ^o	1839	10,83	Flexão 6 ^a ordem plano OXZ
10 ^o	2119	7,81	Torção 3 ^a ordem sobre OX

Tabela 4.7: Resultados numéricos para a viga de 25mm com tratamento 3M espesso

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Fator de Perda (%)	Forma Modal
1 ^o	126	57,74	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	241	40,84	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	423	27,43	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	485	5,06	Torção de 1 ^a ordem sobre OX
5 ^o	651	18,01	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
6 ^o	944	13,01	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ
7 ^o	1003	5,20	Torção de 2 ^a ordem sobre OX
8 ^o	1290	9,81	Flexão de 6 ^a ordem plano OXZ
9 ^o	1561	6,93	Torção de 3 ^a ordem sobre OX
10 ^o	1695	8,20	Flexão de 7 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.8: Resultados numéricos para a viga de 25mm com manga térmorretrátil

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Fator de Perda (%)	Forma Modal
1 ^o	71	0,00	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	199	0,00	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	389	0,00	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	527	0,00	Torção de 1 ^a ordem sobre OX
5 ^o	644	0,00	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
6 ^o	875	0,00	Flexão de 1 ^a ordem plano OXY
7 ^o	962	0,00	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ
8 ^o	1054	0,00	Torção de 2 ^a ordem sobre OX
9 ^o	1344	0,00	Flexão de 6 ^a ordem sobre OXZ
10 ^o	1584	0,00	Torção de 3 ^a ordem sobre OX

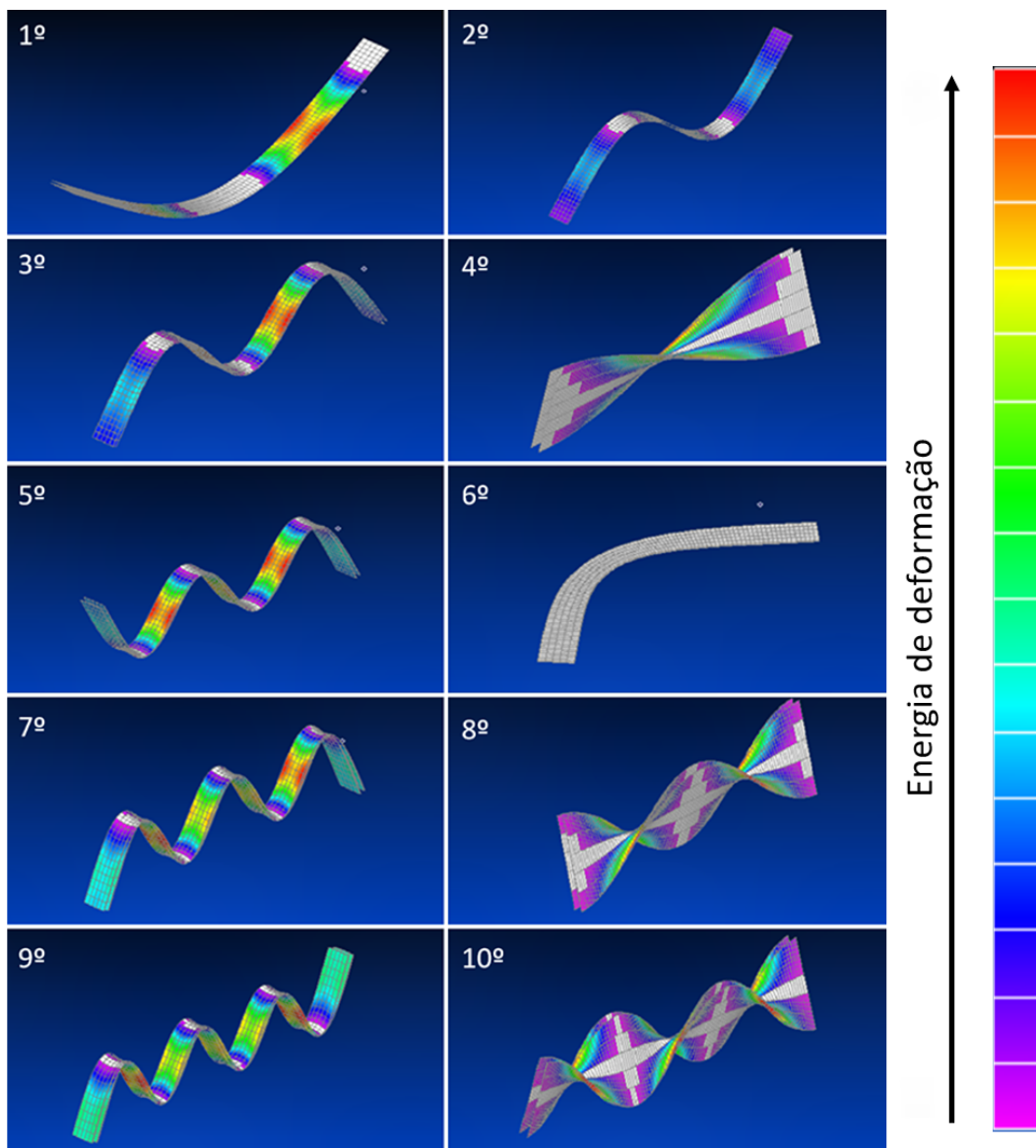


Figura 4.6: Formas Modais Numéricas para a Viga de 25mm com Tratamento 3M 434

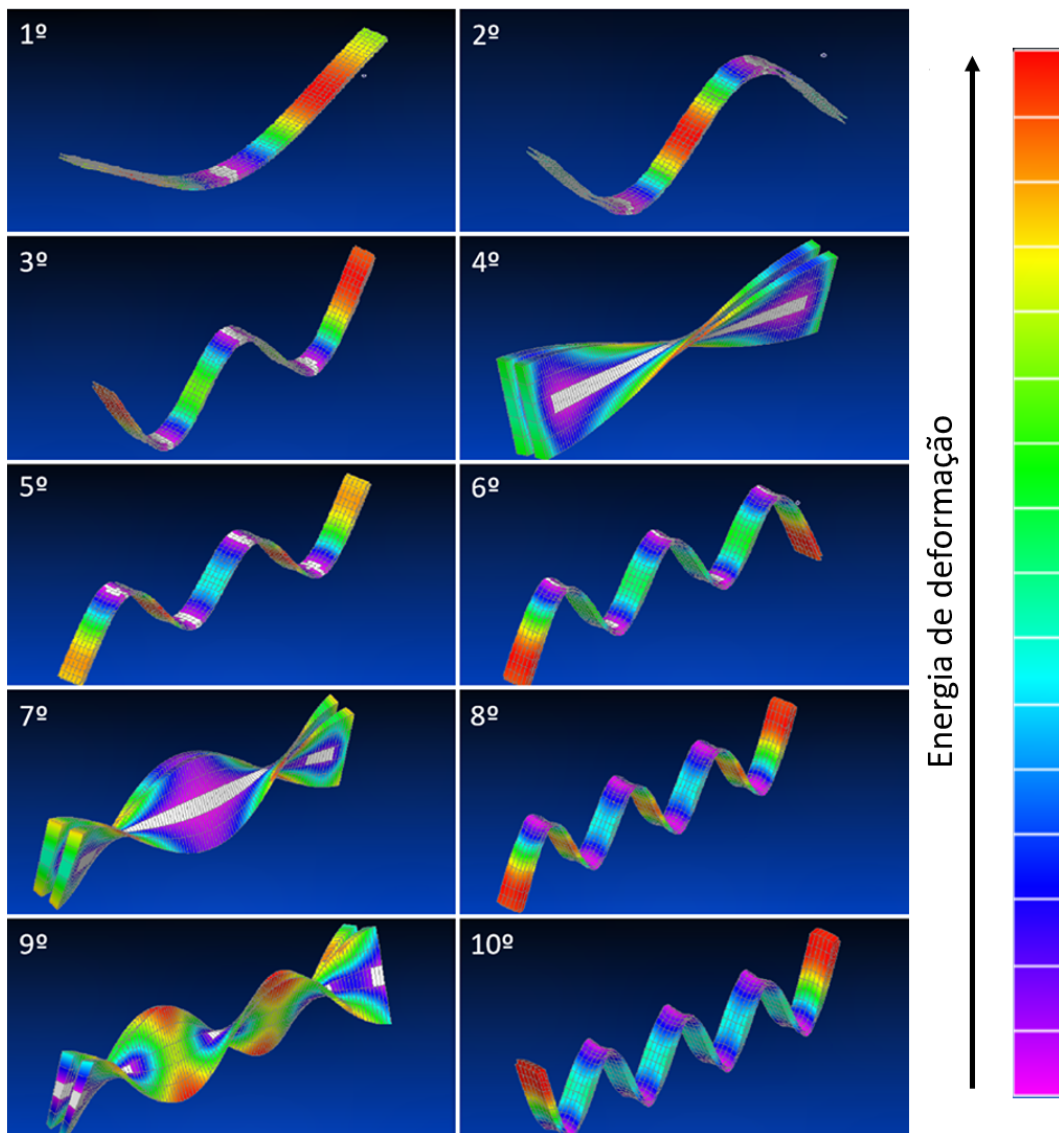


Figura 4.7: Formas modais numéricas para a viga de 25mm com tratamento 3M mais espesso

Estudo Experimental

Após se realizar a análise numérica, começou-se a preparar as vigas para receberem os tratamentos. Esta preparação consistia em desgordurar e limpar toda a superfície da viga com acetona. Depois de estarem preparadas, aplicavam-se os tratamentos. No caso dos da 3M, retirava-se a camada de proteção e aplicavam-se na superfície da viga, assegurando que se exercia uma pressão constante de modo ao tratamento ficar uniformizado e sem bolhas de ar. Para aplicar a manga termorretrátil, era necessário fornecer calor para esta se conformar à forma da viga. Posteriormente, cortavam-se os excessos de material das superfícies laterais, assegurando assim a configuração *sandwich*. No caso do tratamento constituído por aglomerado de cortiça e alumínio, a aplicação desenvolveu-se em duas fases. Primeiro aplicou-se a cortiça e posteriormente, a camada de alumínio. O primeiro tratamento a ser aplicado foi o da fita da 3M de referência 434, como se pode ver na Figura 4.8. Os valores referentes ao ensaio deste tratamento encontram-se na Tabela 4.9. O segundo tratamento aplicado foi também da 3M. Os resultados deste ensaio encontram-se na Tabela 4.10. Posteriormente, ainda na viga de 25mm, foi aplicada uma manga termorretrátil, modelo EPS300 da HellermannTyton.

Na viga de 30mm foi aplicado um tratamento composto por aglomerado de cortiça e alumínio como camada de restrição.

Nas próximas tabelas o valor de amortecimento é referente ao fator de amortecimento modal.

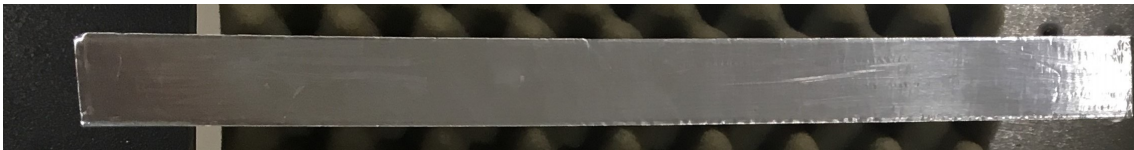


Figura 4.8: Viga com tratamento da 3M 434



Figura 4.9: Viga com tratamento da 3M espesso

Tabela 4.9: Resultados experimentais para a viga de 25mm tratada com 3M 434

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	107	1,45	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	294	2,55	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	554	2,81	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	865	2,85	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ

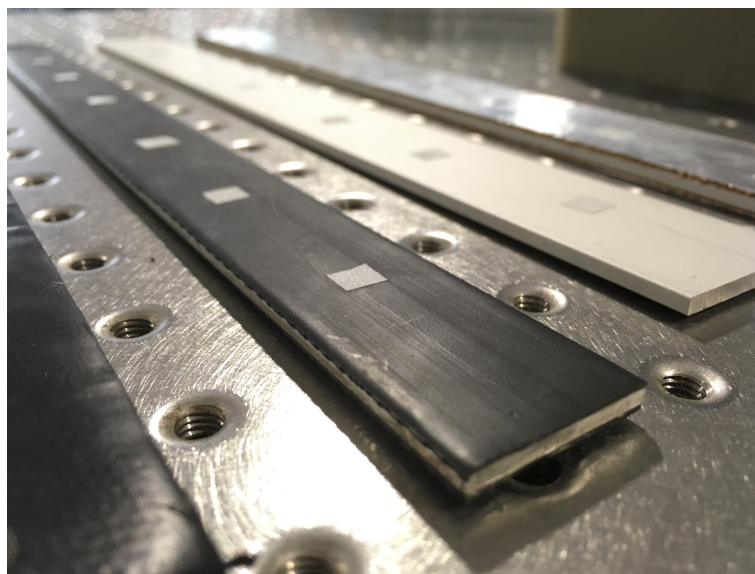


Figura 4.10: Viga de 25mm com manga EPS300

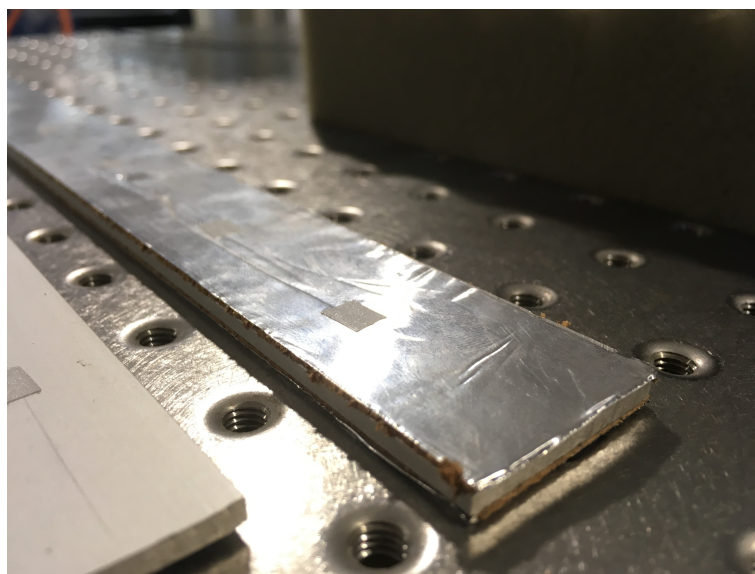


Figura 4.11: Viga de 30mm com aglomerado de cortiça e alumínio

Tabela 4.10: Resultados experimentais para a viga de 25mm tratada com 3M espesso

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	144	9,44	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	337	14,50	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	572	11,60	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	921	15,70	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.11: Resultados experimentais para a viga de 25mm tratada com HellermannTyton EPS300

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	81	0,82	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	226	0,31	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	458	0,52	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	732	0,22	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1110	0,22	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ
6 ^o	1550	0,25	Flexão de 6 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.12: Resultados experimentais para a viga de 30mm tratada com aglomerado cortiça e alumínio

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Natural
1 ^o	143	1,19	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	391	2,17	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	757	2,72	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	1220	2,24	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1810	1,97	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ

4.1.3 Discussão de Resultados

Tal como se esperava, os resultados para as vigas tratadas são bastante satisfatórios. Quando aplicados tratamentos com camada de restrição, os valores de amortecimento obtidos foram muito bons. Numericamente era esperado que o tratamento mais espesso da 3M proporcionasse um amortecimento mais eficaz que o tratamento da 3M 434 e isto verificou-se experimentalmente. É possível observar nas figuras 4.6 e 4.7 que o viscoelástico para o tratamento mais espesso contém maior energia de deformação modal. Com isto esperava-se que o mesmo libertasse mais energia. Também se esperava, tendo em conta os valores numéricos, que a viga tratada com manga termorretrátil iria ter um amortecimento igual ao da viga sem tratamento e, de facto, os valores de amortecimento obtidos foram praticamente nulos. Numericamente, verificou-se que a fita 3M 434 era menos eficaz para o primeiro modo do que para os seguintes, na gama em estudo, o que se verificou também experimentalmente. Contudo, esperava-se numericamente que o contrário acontecesse para a fita da 3M mais espessa e, experimentalmente tal não se verificou.

Relativamente à massa acrescentada, o tratamento da 3M espesso foi o que introduziu mais massa, adicionando 23 gramas à viga onde foi aplicado, o que se traduz num aumento de quase 50% face à viga sem tratamento. Seguiu-se a manga termorretrátil EPS 300 a adicionar cerca de 18 gramas, o que indica um aumento de massa percentual de quase 39 %. Os tratamentos 3M 434 e o tratamento composto por aglomerado de cortiça e alumínio originaram aumentos de massa de cerca de 10 gramas. Todos estes valores podem ser consultados na Tabela 4.13.

Os tratamentos superficiais alteram os valores das frequências naturais. Neste aspeto, a fita da 3M espessa originou as maiores alterações destes valores. Para o primeiro modo, o aumento foi de cerca de 50%. Tendo em conta que estas frequências são dependentes da massa do sistema e da sua rigidez, percebe-se que, apesar de ter sido adicionada muita massa ao sistema, a rigidez adicionada foi superior a este valor.

O outro tratamento, o 3M 434, também aumentou ligeiramente as frequências naturais. Tal como no caso anterior, pensa-se que seja devido ao aumento de rigidez induzido, que, apesar de ser inferior ao da outra fita da 3M, a massa adicionada foi menor. No caso da manga termorretrátil, esta adiciona massa, enquanto que a alteração de rigidez é praticamente desprezável e as frequências naturais diminuíram com a aplicação deste material.

No Anexo B encontram-se os modos naturais experimentais obtidos para a viga de 30mm (Figura B.1).

Já foi referido que o tratamento da 3M mais espesso foi o mais eficiente a fornecer amortecimento. Estatisticamente, a razão de amortecimento conseguida chegou a ser 13000 vezes superior ao valor original. Na Tabela E.1 e nas figuras 4.12, 4.13 e 4.14, encontram-se dispostos graficamente todos os valores referentes às modificações de amortecimento e de frequência. As magnitudes das FRF referentes a estes ensaios podem ser consultadas no Anexo A (A.3, A.4, A.5 e A.6). Assim conclui-se, tendo em conta os resultados gerais, que a fita da 3M mais espessa providencia um grande amortecimento e é um bom tratamento para aplicar nas tubagens, sendo a que acrescenta mais massa às vigas.

Tabela 4.13: Massa adicionada pelos tratamentos às vigas

Tratamento	Massa Acrescentada (g)	Varição de Massa (%)
Tratamento 3M 434	9,44	20,55
Tratamento 3M E	22,57	49,14
EPS 300	17,87	38,91
Cortiça e Alumínio	10,21	13,29

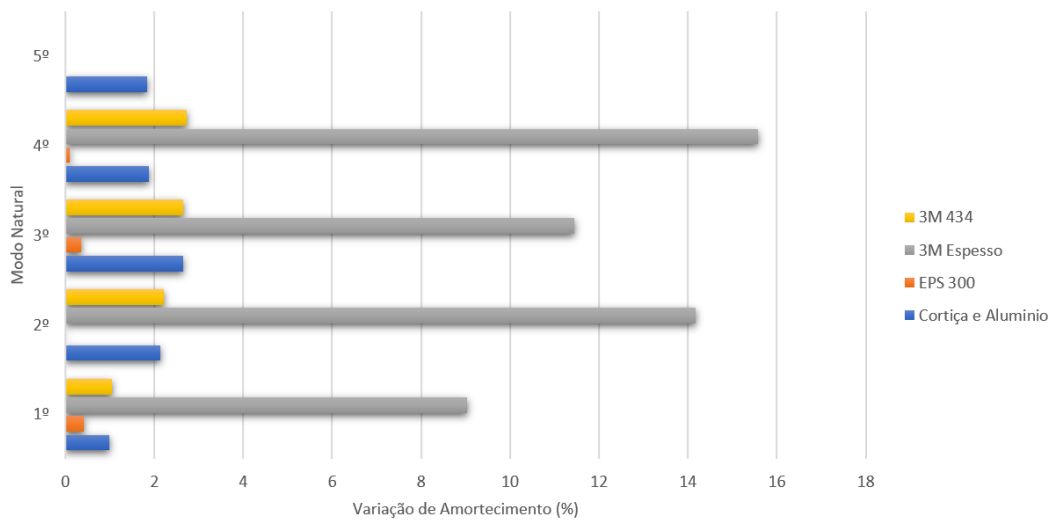


Figura 4.12: Alteração do fator de amortecimento modal na viga

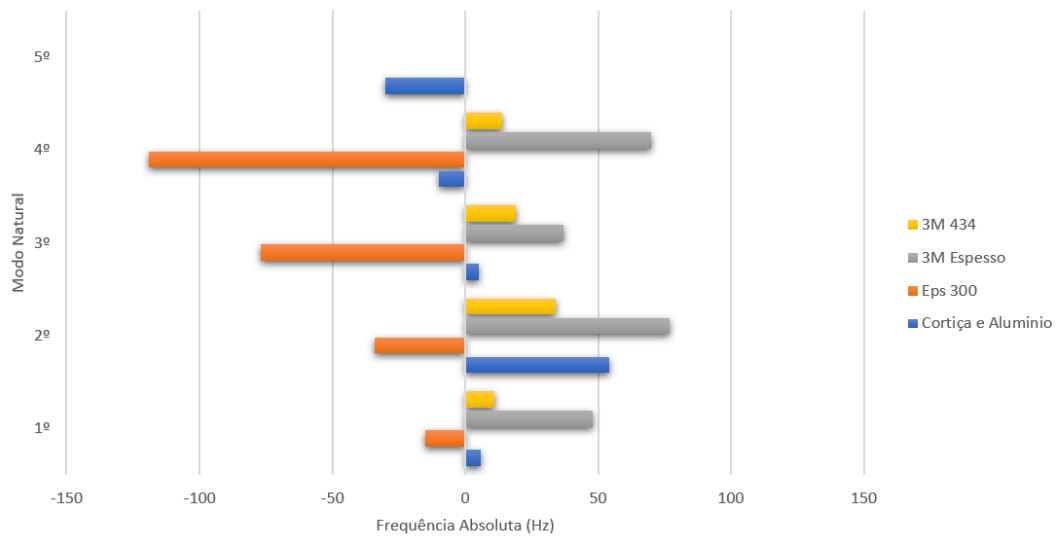


Figura 4.13: Variação absoluta do valor das frequências naturais

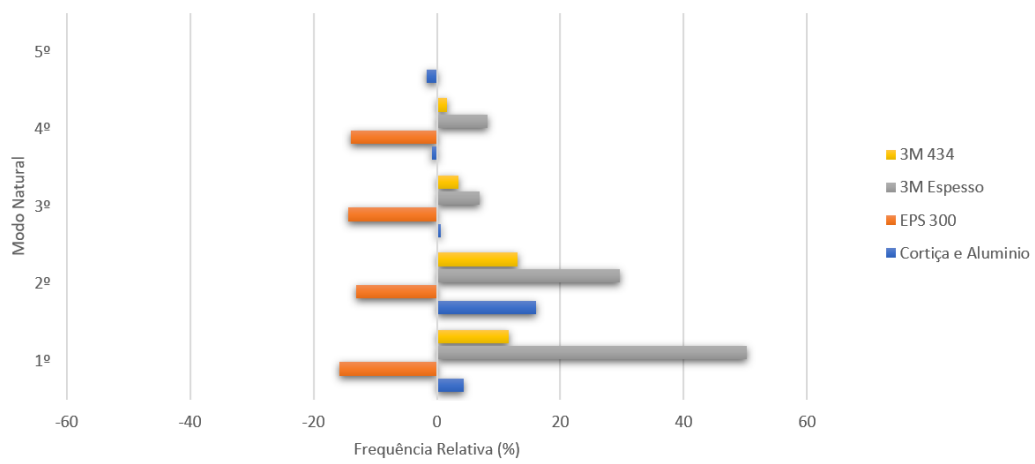


Figura 4.14: Variação relativa do valor das frequências naturais

4.2 Análise dos Tubos

Dada a elevada eficiência dos tratamentos de amortecimento nas vigas, resolveu-se então testar alguns dos tratamentos anteriormente usados nas vigas de modo a verificar se os mesmos funcionam nos tubos, uma vez que possuem uma geometria diferente.

De modo a simplificar a discussão de resultados, arbitrou-se um sistema de eixos como ilustrado nas figuras 4.15 e 4.16.

Para realizar os ensaios, foram fornecidos três tipos de tubos em cobre, semelhantes aos utilizados nas bombas de calor, com dimensões distintas como se pode verificar na Figura 4.17. A Tabela 4.14 contém algumas características geométricas destes tubos.

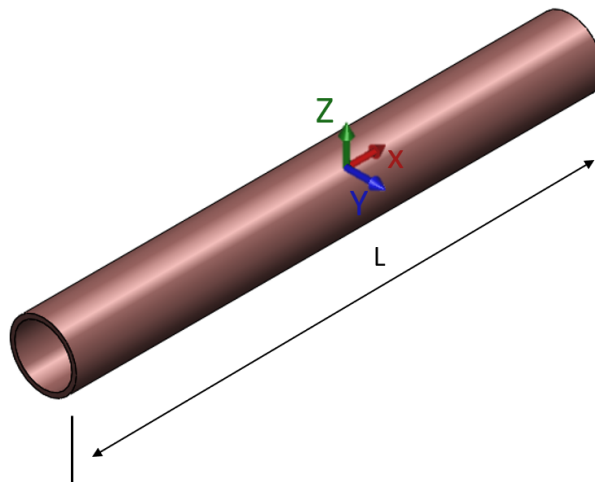


Figura 4.15: Conjunto de eixos arbitrado para o tubo

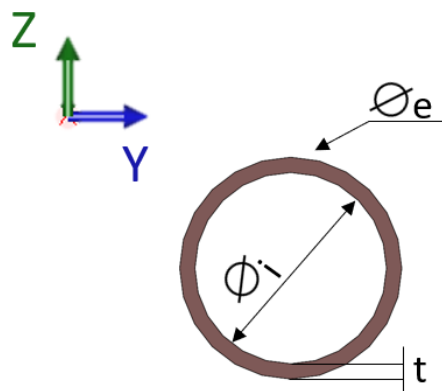


Figura 4.16: Secção de corte do tubo

4.2.1 Tubos sem Tratamento

Tal como para as vigas, começou-se o estudo pelos tubos não tratados de modo a definir a referência de comparação para os tubos após o tratamento.

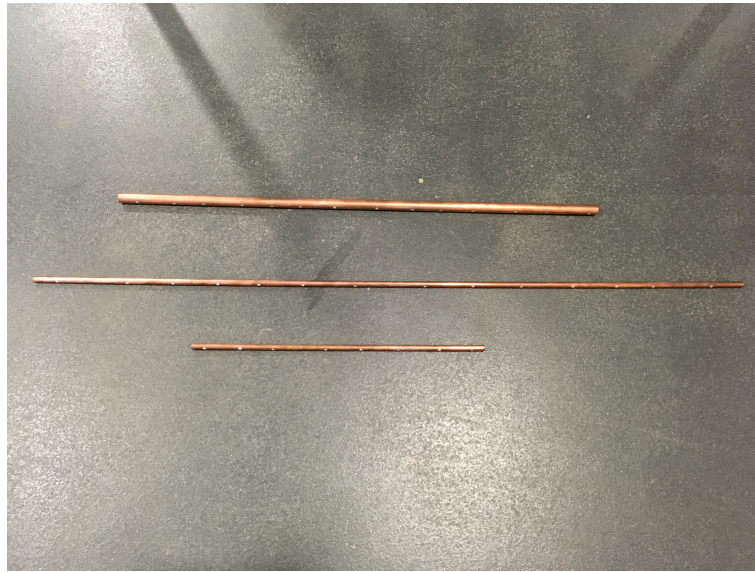


Figura 4.17: Tubos usados no estudo

Tabela 4.14: Dimensões tubos retos

Características	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3
Diâmetro Externo ($\varnothing e$) (mm)	17	10	9,5
Diâmetro Interno ($\varnothing i$) (mm)	15,30	8,80	7,80
Comprimento (L) (mm)	800	1145	460
Espessura (t) (mm)	0,85	0,60	0,85
Massa (g)	278,82	152,62	90,70

Estudo Numérico

Os tubos do tipo 1 foram simulados utilizando 4000 elementos de placa. Os tubos do tipo 2 foram simulados com 4296 elementos e os tubos do tipo 3 com 1728 elementos. Na Tabela 4.15 encontram-se os resultados obtidos através do programa de elementos finitos.

Devido à sua secção circular, alguns dos modos naturais do tubo sem tratamento serão iguais nas duas direções do plano da sua secção. Devido também a esta secção perfeitamente circular, pode-se dizer que, todas as frequências naturais, à exceção da que se traduz no movimento de torção do perfil, se repetirão. Como tal, apenas se encontram ilustradas na Figura 4.18, as formas modais para o tubo tipo 1, de 17mm de diâmetro, pois os outros possuem formas idênticas.

Estudo Experimental

Realizaram-se para os três tipos de tubos, testes de impacto e testes com o excitador eletrodinâmico. Com estes testes foi possível obter as frequências correspondentes aos modos naturais, as quais se encontram representadas nas tabelas 4.16 e 4.17. Tal como nas vigas, é impossível identificar os modos naturais de rotação com o tipo de medição realizado. As magnitudes das FRF referentes a estes ensaios encontram-se no fim do

Tabela 4.15: Resultados numéricos dos tubos sem tratamento

Frequências Naturais	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Forma Modal
1 ^a /2 ^a frequência (Hz)	123	35	201	Flexão de 1 ^a ordem
3 ^a /4 ^a frequência (Hz)	338	97	551	Flexão de 2 ^a ordem
5 ^a /6 ^a frequência (Hz)	658	190	1074	Flexão de 3 ^a ordem
7 ^a /8 ^a frequência (Hz)	1077	314	-	Flexão de 4 ^a ordem
9 ^a frequência (Hz)	1485	-	-	Torção de 1 ^a ordem
10 ^a /11 ^a frequência (Hz)	1589	467	-	Flexão de 5 ^a ordem

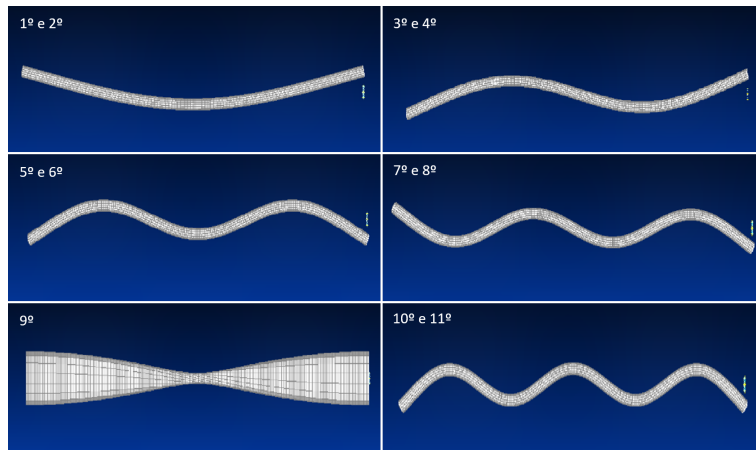


Figura 4.18: Formas modais numéricas para o Tubo

documento (Anexo A). Dado que só os tubos de 17mm iriam receber tratamento, apenas se calculou o amortecimento para este, e o seu valor encontra-se listado na Tabela 4.18.

Tabela 4.16: Resultados experimentais para o teste de impacto

Frequências Naturais	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Forma Modal
1/2 ^a Frequência (Hz)	-	-	200	Flexão de 1 ^a ordem
3/4 ^a Frequência (Hz)	330	95	525	Flexão de 2 ^a ordem
5/6 ^a Frequência (Hz)	635	183	1305	Flexão de 3 ^a ordem
7/8 ^a Frequência (Hz)	1040	308	-	Flexão de 4 ^a ordem
9 ^a Frequência (Hz)	-	-	-	Torção de 1 ^a ordem
10/11 ^a Frequência (Hz)	1550	459	-	Flexão de 5 ^a ordem

Comparação dos Resultados

Nesta subsecção encontram-se os resultados dos dois tipos de ensaios experimentais e ainda os resultados da simulação feita no Femap/Nx Nastran. Nas tabelas 4.19, 4.20 e 4.21, encontram-se os resultados dos tubos do tipo 1, 2 e 3 respetivamente.

Tabela 4.17: Resultados experimentais para os ensaios dos tubos com excitador eletrodinâmico

Frequências Naturais	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Forma Modal
1/2 ^a Frequência (Hz)	123	34	198	Flexão de 1 ^a ordem
3/4 ^a Frequência (Hz)	338	94	534	Flexão de 2 ^a ordem
5/6 ^a Frequência (Hz)	656	181	1076	Flexão de 3 ^a ordem
7/8 ^a Frequência (Hz)	1073	308	-	Flexão de 4 ^a ordem
9 ^a Frequência (Hz)	-	-	-	Torção de 1 ^a ordem
10/11 ^a Frequência (Hz)	1538	452	-	Flexão de 5 ^a ordem

Tabela 4.18: Resultados experimentais para o Tubo 1 (17mm)

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	123	0,00	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	338	0,00	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	656	0,04	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	1073	0,02	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1538	0,01	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.19: Comparação de resultados para tubo 1

Frequências Naturais	Teste de Impacto	Teste com excitador	Simulação Numérica
1/2 ^a frequência (Hz)	-	123	123
3/4 ^a frequência (Hz)	330	338	338
5/6 ^a frequência (Hz)	635	656	658
7/8 ^a frequência (Hz)	1040	1073	1077
10/11 ^a frequência (Hz)	1550	1538	1589

Tabela 4.20: Comparação de resultados para tubo 2

Frequências Naturais	Teste com gerador	Teste com excitador	Simulação Numérica
1/2 ^a frequência (Hz)	-	34	35
3/4 ^a frequência (Hz)	95	94	97
5/6 ^a frequência (Hz)	183	181	190
7/8 ^a frequência (Hz)	308	308	314
10/11 ^a frequência (Hz)	459	452	467

Tabela 4.21: Comparação de resultados para tubo 3

Frequências Naturais	Teste de Impacto	Teste com excitador	Simulação Numérica
1 ^a frequência (Hz)	200	198	201
2 ^a frequência (Hz)	525	534	551
3 ^a frequência (Hz)	1305	1076	1074

4.2.2 Tubos com Tratamento

Tal como nas vigas, haviam diversos tratamentos para aplicar. Dentro de todos os tratamentos disponíveis, aplicou-se a fita da 3M mais espessa, que mostrou ótimos resultados nas vigas tratadas, bem como as mangas termorretráteis da HellermannTyton, modelos

SE28, TAN32, HA67 e EPS300, e ainda uma da Cellpack Modelo SR2. Aplicou-se também um tratamento composto por aglomerado de cortiça e uma camada de restrição em alumínio.

Estudo Numérico

Da mesma forma que não havia dados que permitissem caracterizar os tratamentos utilizados nas vigas, também não foi possível identificar as propriedades reais dos tratamentos aqui aplicados. Recorreu-se então ao MSE adaptado, de modo a poder verificar qual o tratamento mais eficaz.

É necessário referir que tanto os tubos, como as camadas de restrição, foram simulados com elementos de placa, enquanto que, os materiais viscoelásticos foram simulados com elementos sólidos. Todas as simulações foram realizadas na ausência de condições de fronteira, ou seja, simulando as condições de vibração dum corpo livre no espaço.

Começou-se por simular o tratamento da 3M mais espesso com 4 posições diferentes, como está ilustrado na Figura 4.19. O objetivo era simular, na configuração 1, uma tira com 10mm de largura e 800mm de comprimento, aplicada a todo o comprimento, e na configuração 2, uma tira de 10mm de largura e 400mm de comprimento, aplicada na região de 200mm a 600mm do tubo. Na configuração 3 simulou-se a aplicação de duas tiras, com 10mm de largura e 200mm de comprimento, nas pontas dos tubos. Na última configuração simularam-se tiras com as mesmas dimensões das aplicadas na configuração 3 mas aplicadas na região de 100mm a 300mm e de 500mm a 700mm.

Estas aplicações vão fornecer um maior amortecimento na direção perpendicular à da sua aplicação.

Com recurso ao Modal Strain Energy, calculou-se o fator de perda para os tratamentos nas diferentes configurações.

Seguidamente, simularam-se os tubos com mangas termorretráteis, usando viscoelásticos sem restrição e calculou-se o amortecimento para estes. Como resultado, não se verificou amortecimento em nenhuma das formas modais, nem se observou os elementos viscoelásticos com energia de deformação. As formas modais possuem a mesma ordem que as do tubo sem nenhum tratamento e na Figura 4.20, pode verificar-se que nenhum dos elementos viscoelásticos contém energia evidente.

Apesar do Femap indicar várias frequências naturais, aqui só serão representadas as que são possíveis de comparar com o estudo experimental, isto é, apenas serão representadas as frequências cujos modos naturais podem ser obtidos com as medições realizadas no estudo experimental. Como tal, em algumas das tabelas, saltam-se algumas frequências naturais. Nas figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24 estão representadas as deformadas do material viscoelástico .

Tabela 4.22: Resultados numéricos para o tratamento da 3M espesso na configuração 1

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Fator de perda (%)	Forma Modal
1 ^o	126	1,25	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	336	0,03	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	633	0,24	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
7 ^o	1007	1,60	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
9 ^o	1422	1,50	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ
12 ^o	1895	3,53	Flexão de 6 ^a ordem plano OXZ



Figura 4.19: Esquema das 4 configurações aplicadas

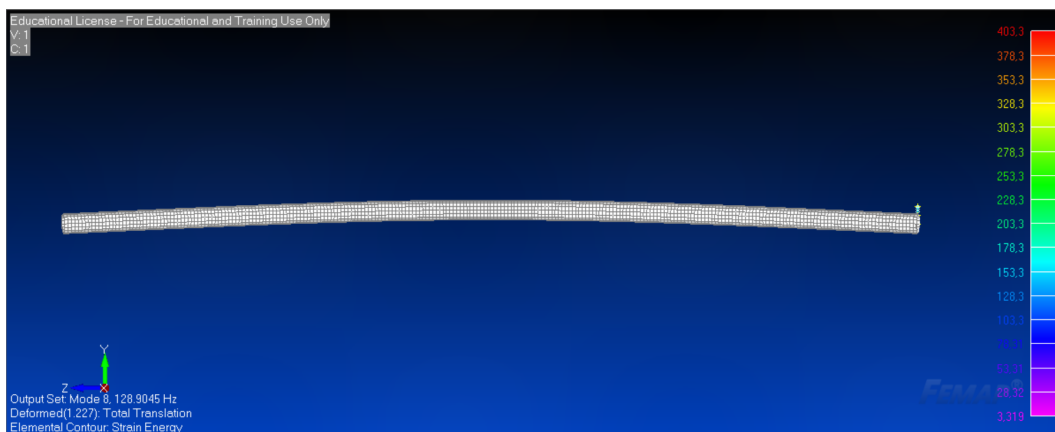


Figura 4.20: Viscoelástico deformado na simulação com manga termorretrátil

Tabela 4.23: Resultados numéricos para o tratamento da 3M espesso na configuração 2

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Fator de Perda (%)	Forma Modal
1 ^o	128	0,03	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	339	0,01	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	640	1,96	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
7 ^o	1015	0,07	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
9 ^o	1434	1,38	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ
12 ^o	1904	5,49	Flexão de 6 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.24: Resultados numéricos para o tratamento da 3M espesso na configuração 3

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Fator de Perda (%)	Forma Modal
1 ^o	126	0,01	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	339	0,01	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	636	2,76	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
7 ^o	1012	0,08	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
9 ^o	1439	0,91	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ
12 ^o	1917	3,02	Flexão de 6 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.25: Resultados numéricos para o tratamento da 3M espesso na configuração 4

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Fator de Perda (%)	Forma Modal
1 ^o	128	0,00	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	339	0,02	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	641	0,40	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
7 ^o	1011	0,09	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
9 ^o	1428	2,13	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ
12 ^o	1914	4,36	Flexão de 6 ^a ordem plano OXZ

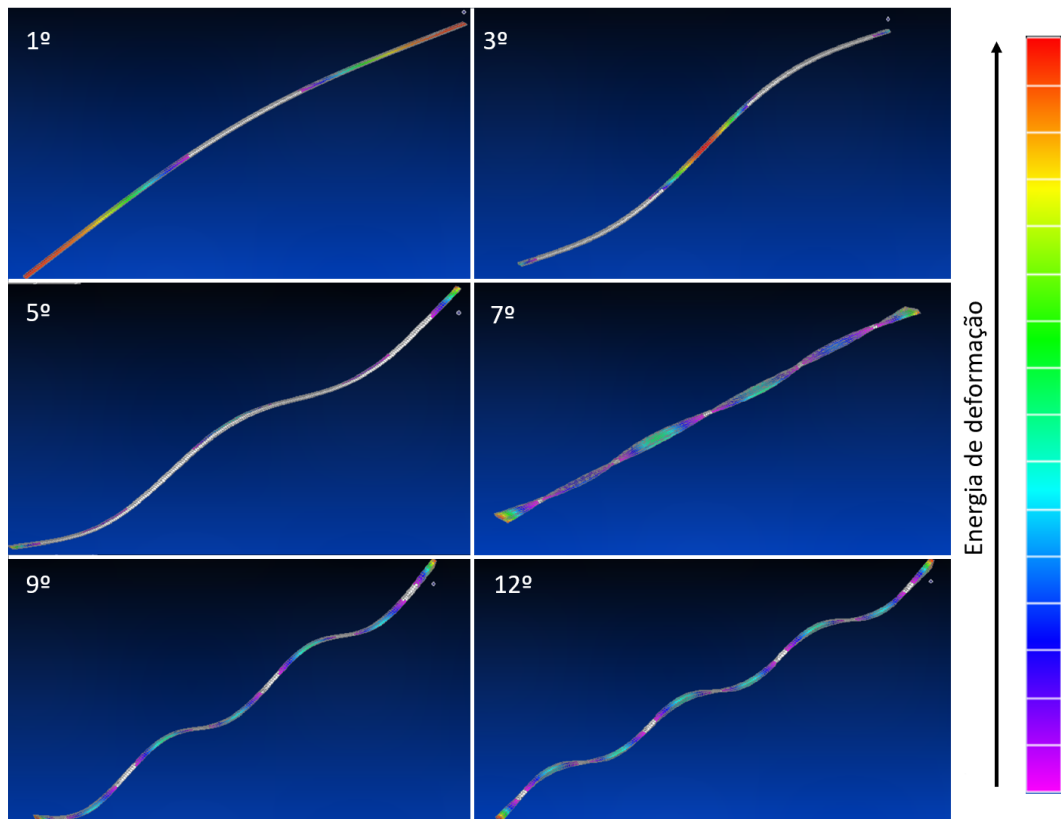


Figura 4.21: Viscoelástico deformado na configuração 1

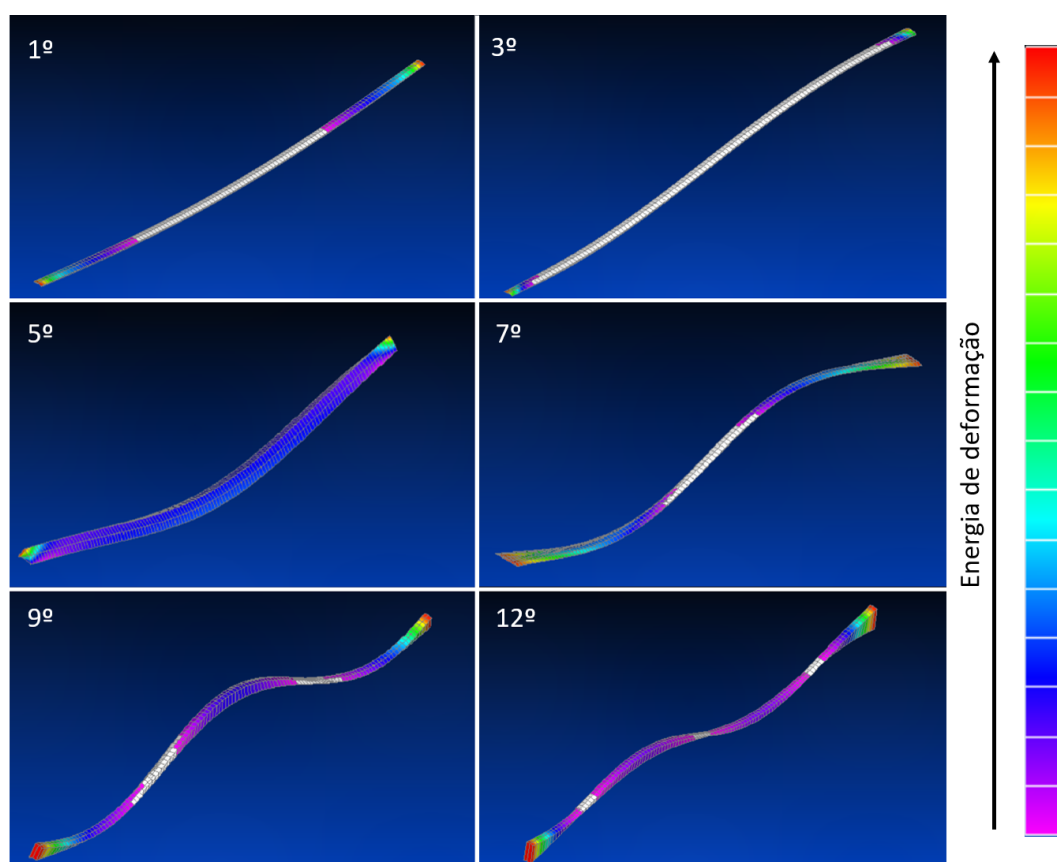


Figura 4.22: Viscoelástico deformado na configuração 2

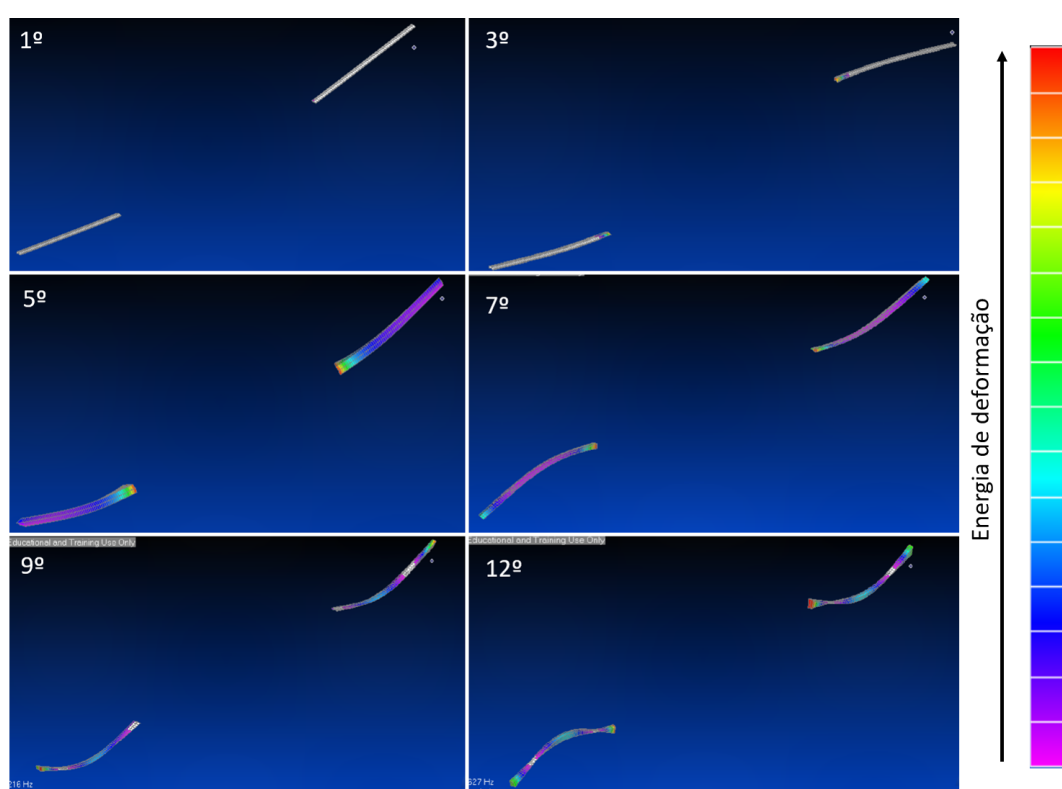


Figura 4.23: Viscoelástico deformado na configuração 3

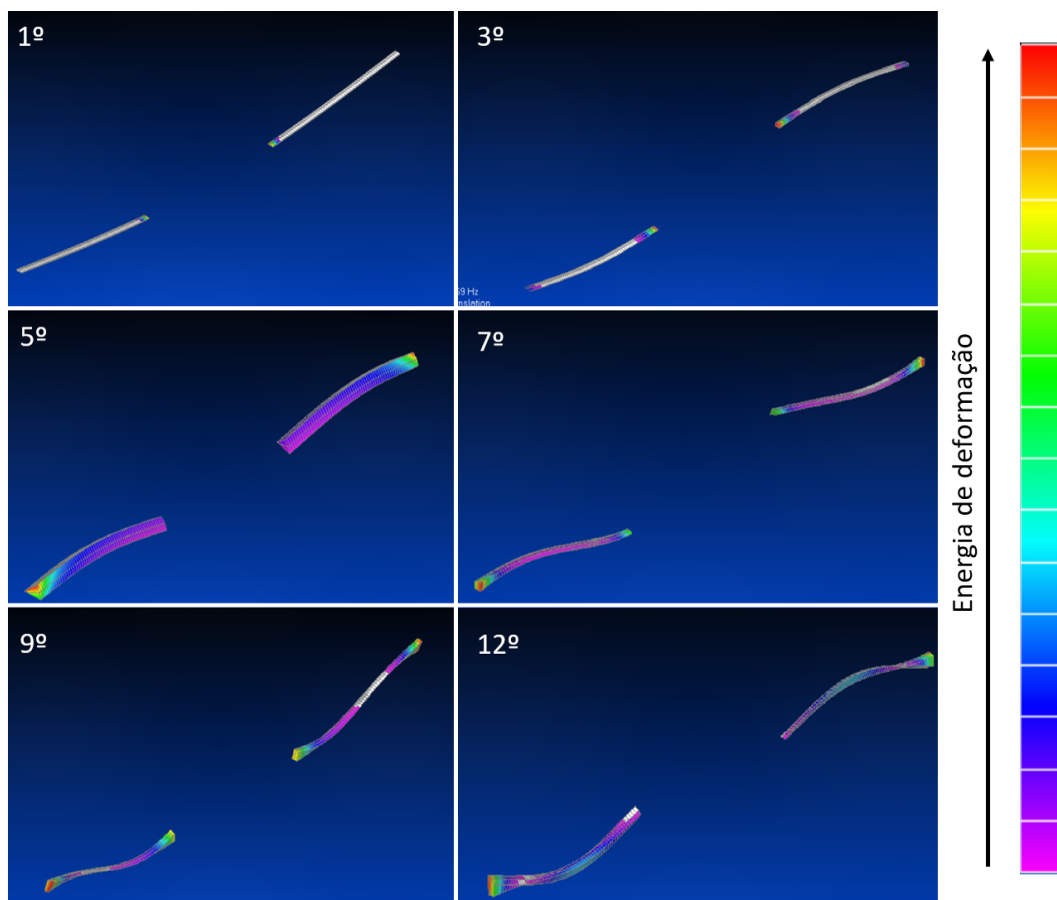


Figura 4.24: Viscoelástico deformado na configuração 4

Estudo Experimental

Começou-se a aplicação dos tratamentos pelos tratamentos da 3M que ofereceram os melhores resultados nas vigas. Escolheram-se quatro configurações diferentes, como ilustrado na Figura 4.19. Os tratamentos aplicaram-se nas posições descritas na análise experimental, estando estas ilustradas nas figuras 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28, com as configurações 1, 2, 3 e 4, respetivamente. Aplicou-se este mesmo material numa configuração em espiral, como se pode observar na Figura 4.29.

Depois de aplicado o tratamento da 3M espesso, nas cinco configurações diferentes, aplicou-se outro constituído por aglomerado de cortiça e alumínio. Aplicou-se a camada de cortiça no tubo todo, enrolada em espiral, cujos elos medem 25mm. Posteriormente, foi aplicada sobre esta cortiça uma camada de alumínio (camada de restrição) também em espiral, mas desta vez enrolada na direção contrária. O resultado final encontra-se ilustrado na Figura 4.31.

Dado que a configuração 1 ofereceu os resultados mais promissores, voltou-se a testar o mesmo material segundo esta mesma configuração, mas desta vez utilizou-se uma tira com, aproximadamente, o dobro da largura. Aplicou-se também nesta mesma configuração aglomerado de cortiça com alumínio a servir como camada de restrição.

Posteriormente aplicaram-se várias mangas termorretráteis aos tubos. A primeira foi da marca Cellpack que tem na sua constituição um termoplástico e cola como se pode ver na Figura 4.32. As outras mangas termorretráteis aplicadas eram da HellermanTyton, tais como a HA67, a EPS300, a Tan32 e a SE28, estão representadas nas figuras 4.33, 4.34, 4.35 e 4.36.

Da Tabela 4.26 até a Tabela 4.37, encontram-se os valores de amortecimento para os tubos com todos os tratamentos aplicados neste estudo.

Na secção dos anexos, encontram-se dispostas todas as funções FRF diretas (apenas a magnitude) referentes aos ensaios aqui documentados sobrepostas com as funções FRF originais dos tubos sem nenhum tratamento, de modo a ser mais fácil de comparar e ver a influência do tratamento aplicado.

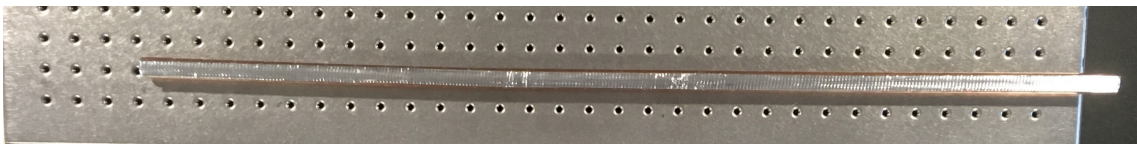


Figura 4.25: Tubo com tratamento da 3M espesso na configuração 1

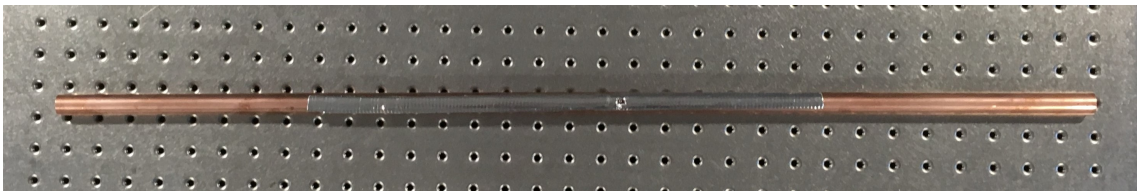


Figura 4.26: Tubo com tratamento da 3M espesso na configuração 2

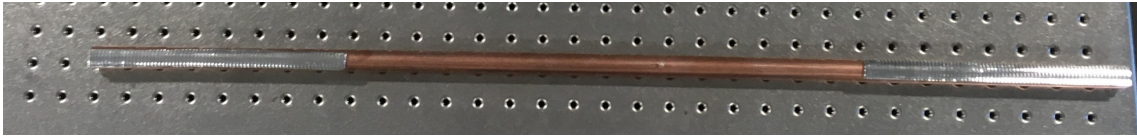


Figura 4.27: Tubo com tratamento da 3M espesso na configuração 3



Figura 4.28: Tubo com tratamento da 3M espesso na configuração 4



Figura 4.29: Tubo com tratamento da 3M espesso em Espiral

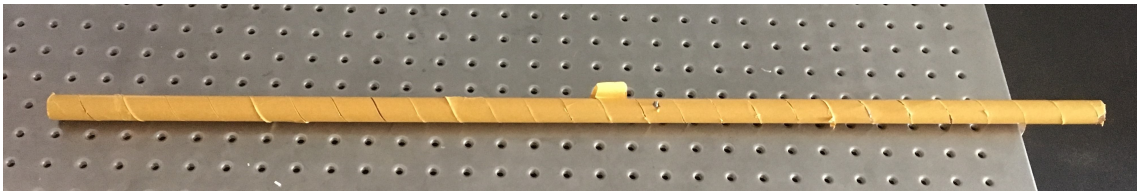


Figura 4.30: Tubo com aglomerado de cortiça em espiral

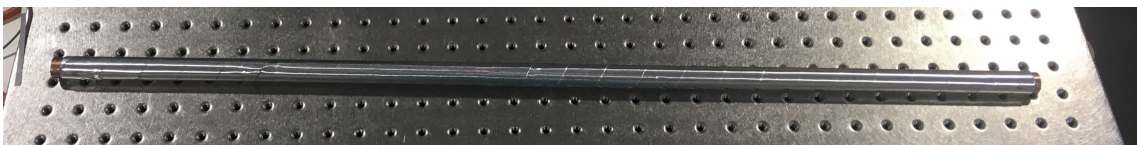


Figura 4.31: Tubo com tratamento de aglomerado de cortiça e alumínio

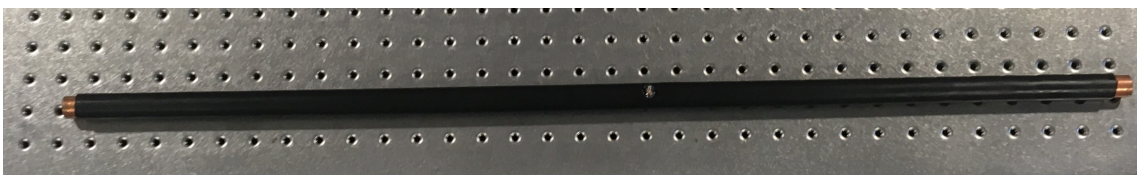


Figura 4.32: Tubo com manga termorretrátil Cellpack



Figura 4.33: Tubo com manga termorretrátil HellermanTyton HA67



Figura 4.34: Tubo com Manga Termorretrátil HellermanTyton EPS300



Figura 4.35: Tubo com manga termorretrátil HellermanTyton TAN32

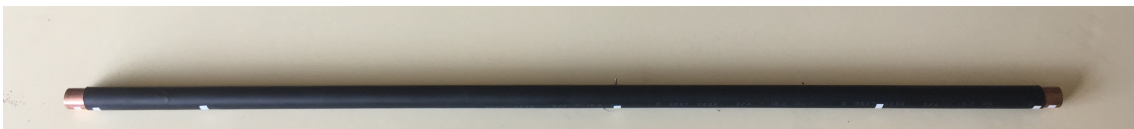


Figura 4.36: Tubo com manga termorretrátil HellermanTyton SE28

Tabela 4.26: Resultados experimentais para o tubo de 17mm com tratamento da 3M espesso na configuração 1

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	122	0,33	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	336	0,48	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	648	0,49	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	1060	0,54	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1550	0,58	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.27: Resultados experimentais para o tubo de 17mm com tratamento da 3M espesso na configuração 2

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	124	0,48	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	335	0,34	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	652	0,15	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	1070	0,32	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1570	0,36	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.28: Resultados experimentais para o tubo de 17mm com tratamento da 3M espesso na configuração 3

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	120	0,04	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	334	0,21	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	647	0,33	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	1060	0,38	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1570	0,33	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.29: Resultados experimentais para o tubo de 17mm com tratamento da 3M espesso na configuração 4

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^a	123	0,42	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^a	337	0,46	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^a	653	0,48	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^a	1060	0,26	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^a	1560	0,31	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.30: Resultados experimentais para o tubo de 17mm com tratamento da 3M em helicoidal

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	110	0,14	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	337	0,67	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	585	0,19	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	957	0,34	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1410	0,37	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.31: Resultados experimentais para o tubo de 17mm com manga Cellpack SR2

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	111	0,24	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	295	0,75	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	586	0,09	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	958	0,08	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1410	0,08	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ
6 ^o	1849	0,09	Flexão de 6 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.32: Resultados experimentais para o tubo de 17mm com manga HellermannTyton SE28

Modo natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	115	0,15	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	317	0,13	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	614	0,24	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	996	0,05	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1470	0,03	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.33: Resultados experimentais para o tubo de 17mm com manga HellermannTyton EPS300

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	117	0,14	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	319	0,10	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	617	0,07	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	1000	0,06	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1480	0,05	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.34: Resultados experimentais para o tubo de 17mm com manga HellermannTyton HA67

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	105	0,17	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	293	0,26	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	571	0,14	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	934	0,15	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1370	0,15	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ
6 ^o	1880	0,16	Flexão de 6 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.35: Resultados experimentais para o tubo de 17mm com tratamento da 3M na configuração 1 com o dobro da largura inicial

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	122	0,72	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	334	0,66	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	638	0,82	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	1040	0,79	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1520	0,88	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.36: Resultados experimentais para o tubo de 17mm com tratamento longitudinal de aglomerado de cortiça e alumínio na configuração 1

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	123	0,20	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	337	0,25	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	653	0,25	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	1060	0,30	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1570	0,31	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.37: Resultados experimentais para o tubo de 17mm com tratamento de aglomerado de cortiça e alumínio como camada de restrição em espiral

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	119	0,22	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	330	0,26	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	647	0,17	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	1040	0,20	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1530	0,15	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ

Tabela 4.38: Resultados experimentais para o tubo de 17mm com manga térmica Hel-
lermannTyton Tan 32

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	115	0,07	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	316	0,11	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	610	0,12	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	994	0,07	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1460	0,08	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ

4.3 Comparação e Discussão de Resultados

Nesta secção são discutidos os resultados obtidos com a análise numérica e com a análise modal experimental, sobre tubos com e sem tratamento viscoelástico.

Tubos sem Tratamento

Atendendo às tabelas 4.19, 4.20 e 4.21, pode destacar-se a boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Verificou-se também que o tubo, que posteriormente foi tratado, inicialmente continha um amortecimento praticamente nulo. Tal como foi referido anteriormente, no Anexo A é possível analisar as FRF destes 3 ensaios em A.7, A.8 e A.9. No Anexo B, na Figura B.2, é também possível observar os modos naturais obtidos para o tubo de 17mm com recurso ao MScope.

Tubos com Tratamento

Ao contrário do que aconteceu nas vigas tratadas, os tubos com tratamento apresentaram valores de amortecimento muito baixos, ou praticamente nulos. Pensava-se que os resultados fossem semelhantes aos das vigas, mas isto não se verificou. Grande parte dos tratamentos funcionaram muito bem nas vigas, mas quando aplicados nos tubos não foram capazes de provocar um amortecimento significativo.

Contudo, os resultados numéricos faziam prever estes resultados, e grande parte dos tratamentos já se mostravam ineficazes nesta parte, como se pode constatar nas tabelas 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29. Nas figuras 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28 é possível verificar a ineficiência destas configurações, pois, muitos dos elementos viscoelásticos não evidenciam níveis significativos de energia de deformação modal, o que indica a inviabilidade destes libertarem energia em quantidade significativa.

Quando foram simuladas numericamente as mangas termorretráteis, havia indícios de que estas não iriam fornecer amortecimento evidente. Contudo, os resultados experimentais obtidos para os tratamentos SR2, e HA67 desmentem esta premissa e verificou-se que estes foram muito eficientes (dentro do possível). Os resultados experimentais obtidos com as restantes mangas, SE28, EPS300 e Tan32, foram de certa forma o que se esperava com os resultados numéricos registando amortecimentos muito baixos. Na Tabela E.3, pode ver-se a influência destas mangas nas frequências naturais e no amortecimento obtido.

Avaliando a massa adicionada ao tubo, induzida pela aplicação dos diferentes tratamentos, é possível observar que, no geral, tanto as mangas termorretráteis como os tratamentos aplicados em espiral, adicionaram bastante massa ao tubo, como é possível verificar na Tabela 4.39. As massas adicionadas pelos outros tratamentos provocam no máximo variações de 10%.

Tendo agora em conta o desvio das frequências naturais (face ao tubo sem tratamento) é possível estabelecer algumas conclusões. Atendendo a que as frequências naturais dependem da massa do sistema e da rigidez, é justificável que os tratamentos que adicionam mais massa ao tubo tenham frequências naturais menores do que as do tubo sem tratamento, caso os aumentos de rigidez induzidos sejam baixos. Isto verifica-se nos tratamentos em espiral, assim como nas mangas termorretráteis, pois adicionam bastante massa ao sistema, mas adicionam pouca rigidez. Nos tratamentos em espiral, a rigidez induzida é quase desprezável o que se deve ao facto de o enrolamento ser helicoidal. Para

os outros tratamentos, a massa e a rigidez adicionadas foram equilibradas, o que origina variações de frequência muito baixas ou até nulas em alguns modos.

Analisando agora o amortecimento obtido, pode verificar-se na Tabela E.2, disposta no Anexo E, que o tratamento da 3M, na configuração com o dobro da largura da configuração 1, foi o mais eficaz para todos os modos, seguindo-se pelo mesmo tratamento da 3M, na configuração 1, conforme é possível observar nas tabelas 4.26 e 4.35. A configuração 4 mostrou-se uma boa opção para aumentar o amortecimento nos primeiros três modos e a configuração 2 ofereceu bons valores de amortecimento tanto para os primeiros dois modos como para os últimos dois.

O tratamento da 3M aplicado em espiral mostrou-se, de certa forma eficaz (face aos restantes aplicados nesta configuração), e registou o maior valor de amortecimento para o segundo modo, como se pode ver na Tabela 4.30.

Apesar dos valores de amortecimento registados serem baixos no geral, quando comparados com os originais, estes chegam a ser cerca de 11000 vezes superiores aos originais para o mesmo modo, o que corresponde a um elevado ganho.

Todas as modificações de frequências naturais e de amortecimento encontram-se dispostas nas tabelas E.2 e E.3, assim como nas figuras 4.37, 4.38 e 4.39, onde são comparadas com o tubo de 17mm, sem tratamento.

As funções de resposta em frequência referentes a estes ensaios estão no Anexo A (figuras A.10, A.11, A.12, A.13, A.14, A.15, A.16, A.17, A.18, A.19, A.20 e A.21).

Assim, conclui-se que nenhum dos tratamentos aplicados nesta solução consegue combater de forma eficaz o problema, uma vez que, nenhum deles é capaz de fornecer um amortecimento considerado satisfatório, e como tal é necessário recorrer soluções alternativas.

Tabela 4.39: Massa adicionada ao tubo

Tratamento	Massa Acrescentada (g)	Varição de Massa (%)
Configuração 1-3M	14,01	5,02
Configuração 2-3M	6,99	2,51
Configuração 3-3M	7,02	2,51
Configuração 4-3M	7,01	2,51
Configuração 1-3M (dobro da largura)	29,44	10,55
Configuração 1-Cortiça e Alumínio	12,74	4,57
Espiral 3M	104,61	37,51
Espiral Cortiça e Alumínio	28,32	10,16
Cellpack SR2	65,46	23,48
HellermannTyton SE28	44,72	16,04
HellermannTyton EPS 300	42,72	15,33
HellermannTyton HA67	101,20	36,30
HellermannTyton TAN 32	50,24	18,02

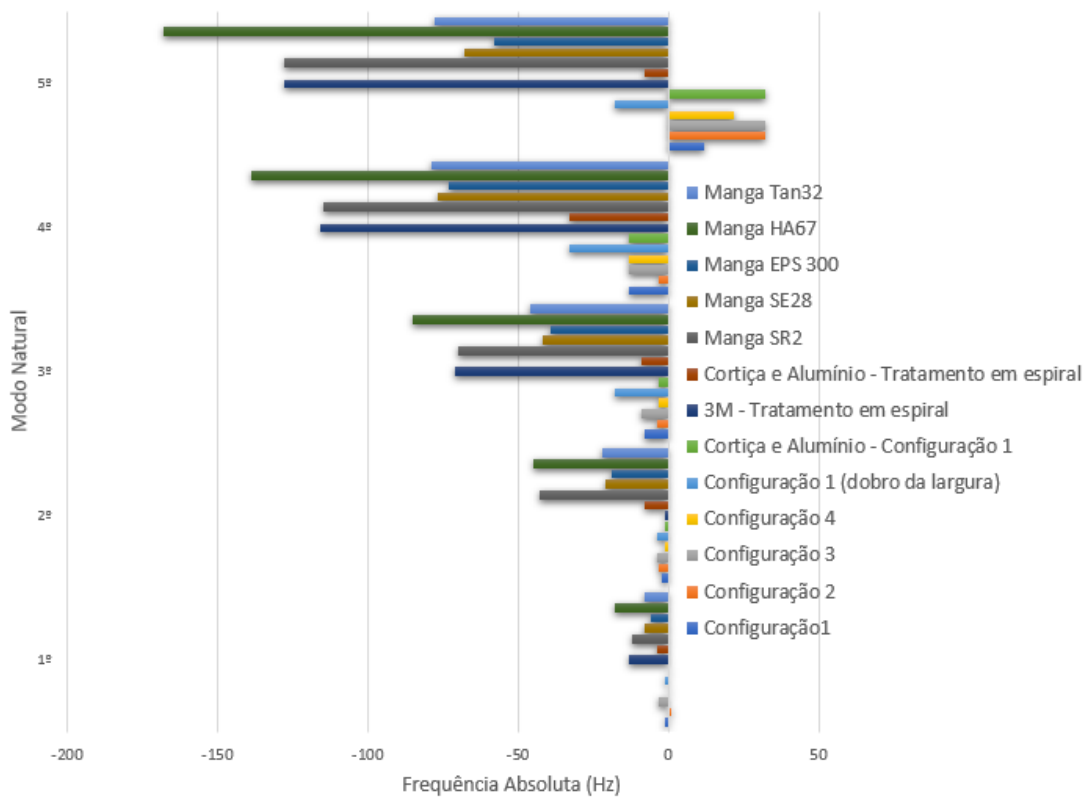


Figura 4.37: Alteração absoluta do valor das frequência naturais

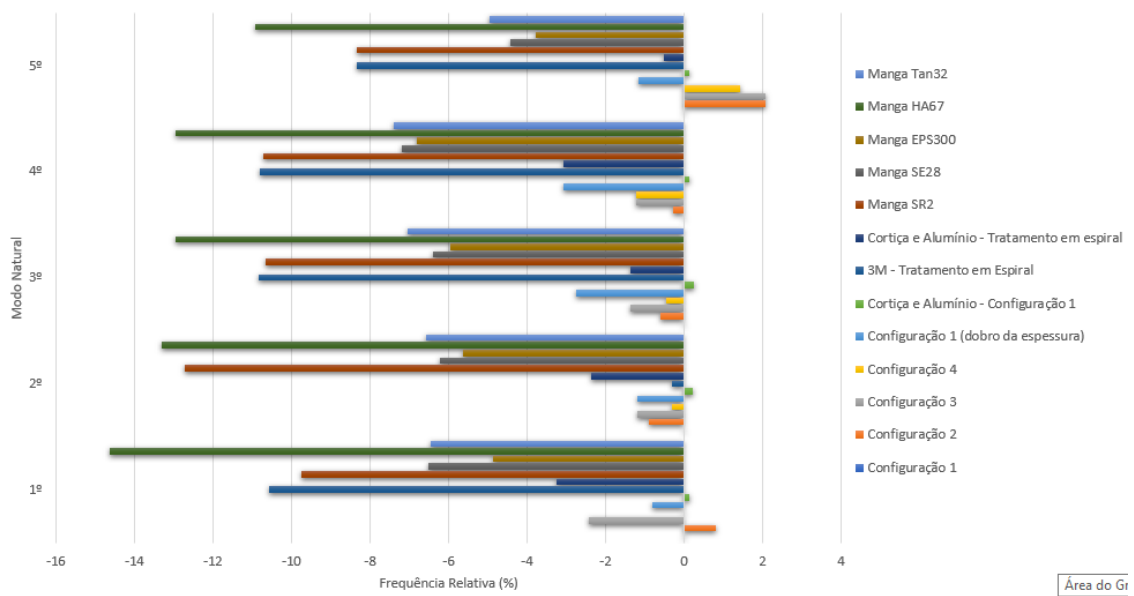


Figura 4.38: Alteração relativa do valor das frequências naturais

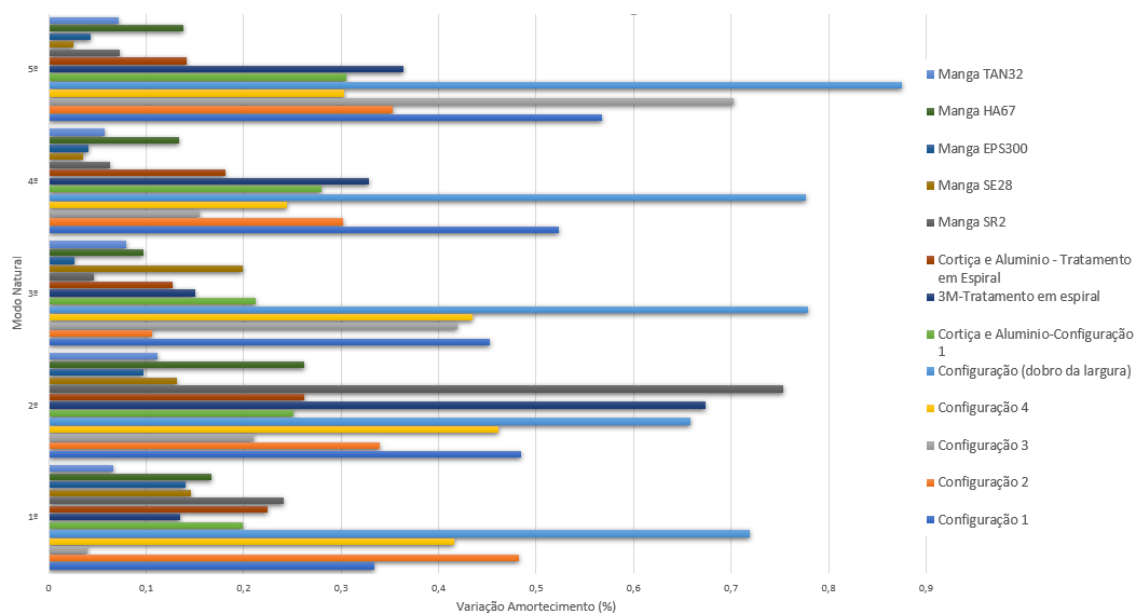


Figura 4.39: Alteração do fator de amortecimento modal no tubo

Capítulo 5

Proposta Final

Após se testar uma série de tratamentos superficiais nas vigas, procedeu-se ao estudo dos tubos com os mesmos tratamentos aplicados. Contrariamente, ao que aconteceu nas vigas, verificou-se um amortecimento reduzido devido, em parte, à limitada deformação da camada de material viscoelástico. Posto isto, pensou-se numa solução que promovesse a deformação em corte da camada de material viscoelástico e que, de certa forma, conjugasse os dois objetos testados até agora, as tubagens e as vigas. Optou-se por recorrer a um sistema que já se tinha mostrado eficaz, as vigas tratadas com um material viscoelástico. Para conectar as vigas amortecidas ao tubo, projetaram-se duas abraçadeiras, como ilustrado na Figura 5.1.



Figura 5.1: Imagem demonstrativa da Proposta

O tratamento a aplicar é conhecido por tratamento integrado (ILD), ou seja, o material viscoelástico é aplicado no núcleo de uma estrutura, que neste caso é a área de contacto entre as duas barras. Tal como referido anteriormente, este tipo de tratamento promove a eficiência do viscoelástico devido à deformação de corte induzida. Na Figura 5.2, onde os elementos do viscoelástico se encontram com cor diferente dos elementos das vigas, é possível observar o efeito da deformação de corte mencionada.

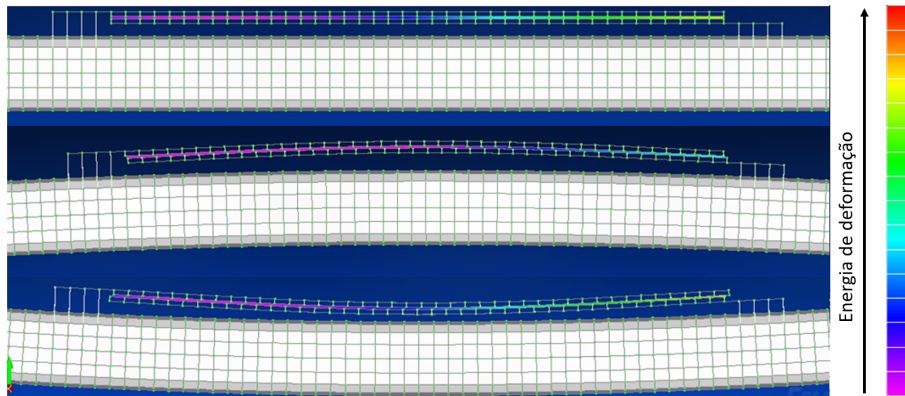


Figura 5.2: Camada viscoelástica sujeita a deformação de corte no protótipo criado

5.1 Estudo Numérico

Ao contrário de outros tratamentos aplicados e estudados ao longo desta dissertação, o tratamento integrado aplicado à solução apresentada, foi alvo de um estudo numérico intensivo. Com o recurso ao programa Femap/Nx Nastran, estudou-se inicialmente para o tubo de 17mm de diâmetro, posições favoráveis à colocação do dispositivo, variando as posições transversais que determinam a altura das abraçadeiras, e longitudinais, que determina a localização das mesmas ao longo do comprimento do tubo, fazendo variar o comprimento do viscoelástico. De modo a garantir que posição escolhida maximizava a libertação de energia do viscoelástico, recorreu-se a uma versão adaptada do método da energia de deformação modal - MSE.

Assim sendo, começou-se por modelar o tubo com uma malha de 4000 elementos de placa. As vigas também foram modeladas com elementos de placa, e o material viscoelástico foi modelado com elementos sólidos.

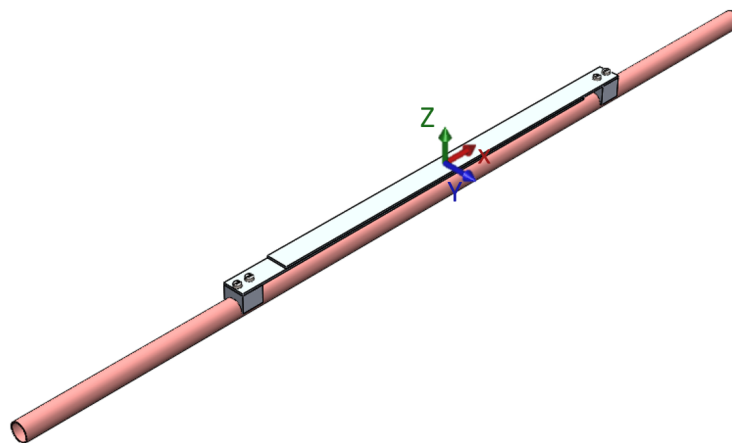


Figura 5.3: Sistema de eixos

Como é possível observar na Figura 5.3, a seção circular do tubo encontra-se no plano OYZ, enquanto que o seu comprimento se encontra ao longo do eixo X. Inicialmente, variou-se apenas a posição longitudinal das abraçadeiras. Como consequência, tanto o comprimento das vigas (variável C na Figura 5.4), como o comprimento da camada de material viscoelástico, varia.

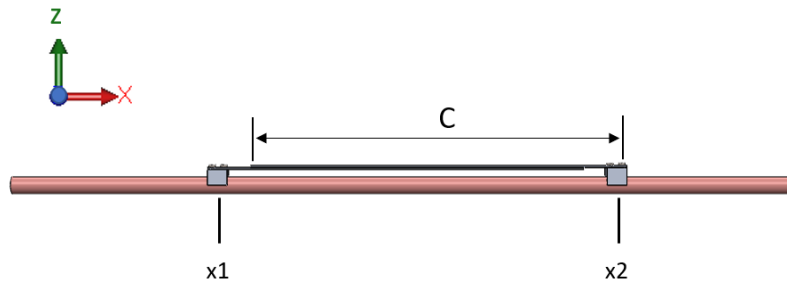


Figura 5.4: Deslocação do sistema longitudinalmente (variação do comprimento da viga e posicionamento das abraçadeiras)

Após encontrar a distância que oferecia o maior valor de fator de perda, começou-se a variar outros parâmetros, nomeadamente, a posição transversal das vigas relativamente ao tubo, que equivale à altura das abraçadeiras (representada com a letra h na Figura 5.5).

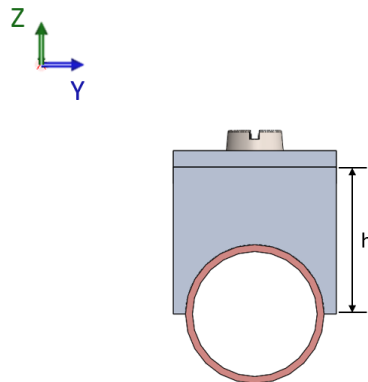


Figura 5.5: Deslocação do sistema transversalmente (variação da altura da abraçadeira)

Posteriormente, após estarem definidas as posições longitudinais e transversais mais favoráveis, alterou-se a espessura da camada de viscoelástico de modo a encontrar também o valor que oferecia maior fator de perda.

Em seguida, analisaram-se numericamente tubos com outros diâmetros, variando os mesmos parâmetros, de modo a maximizar o amortecimento, e assim, obter uma análise global da eficiência deste dispositivo.

Quando, numericamente, se deslocou longitudinalmente o dispositivo (no eixo X), verificaram-se grandes oscilações na primeira frequência natural, assim como nos valores

de amortecimento, como se pode constatar nos gráficos ilustrados nas figuras 5.6 e 5.7.

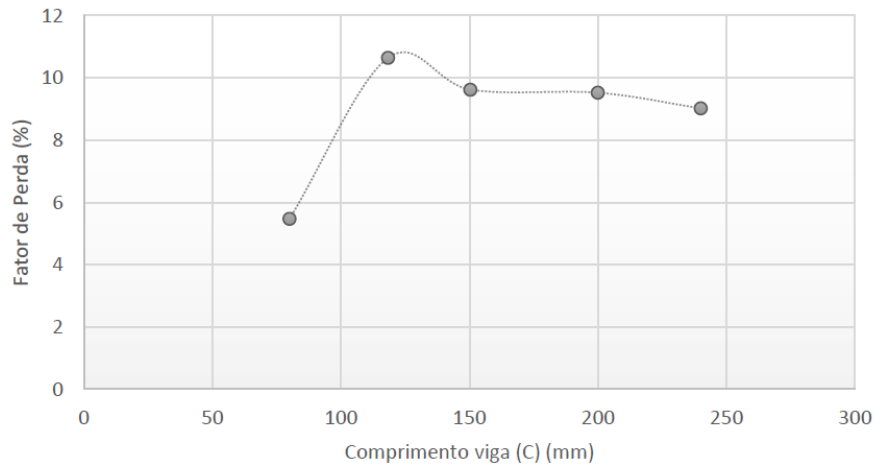


Figura 5.6: Variação do fator de perda em função do comprimento da viga

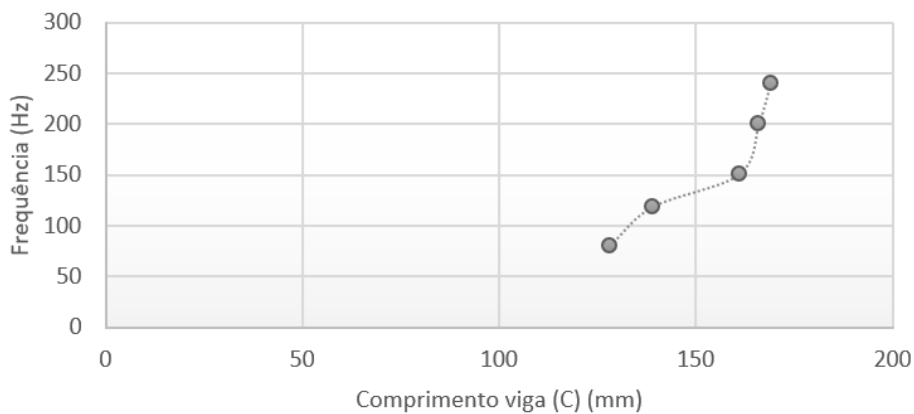


Figura 5.7: Variação da 1ª frequência natural em função do comprimento da viga

Vista a influência da alteração dos dois parâmetros anteriores, procedeu-se então ao estudo da influência dos mesmos na variação da espessura do material viscoelástico.

Este dispositivo foi desenvolvido de modo a maximizar o amortecimento apenas numa direção, contudo, é possível verificar, que para frequências mais elevadas este fornece amortecimento às estruturas onde está inserido também noutras direções, como é possível observar na Figura 5.12.

5.1.1 Estudo Numérico dos Protótipos Criados

Estimou-se a partir da análise numérica, anterior, que teriam de se aplicar duas abraçadeiras de diferentes dimensões. As dimensões destas eram 16mm de altura para a primeira e 18mm para a segunda, medindo ambas 20mm de largura e de comprimento, como se pode verificar no Anexo C. Decidiu-se prototipar três modelos físicos, onde o

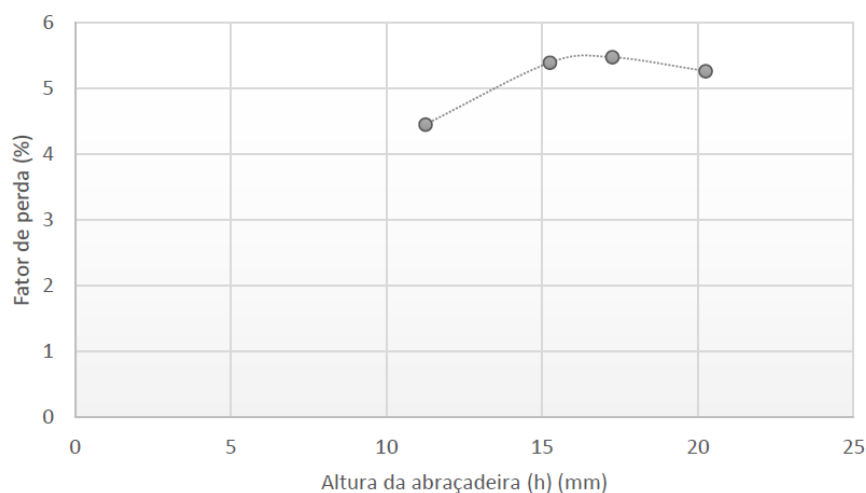


Figura 5.8: Variação do fator de perda em função da altura da abraçadeira (h)

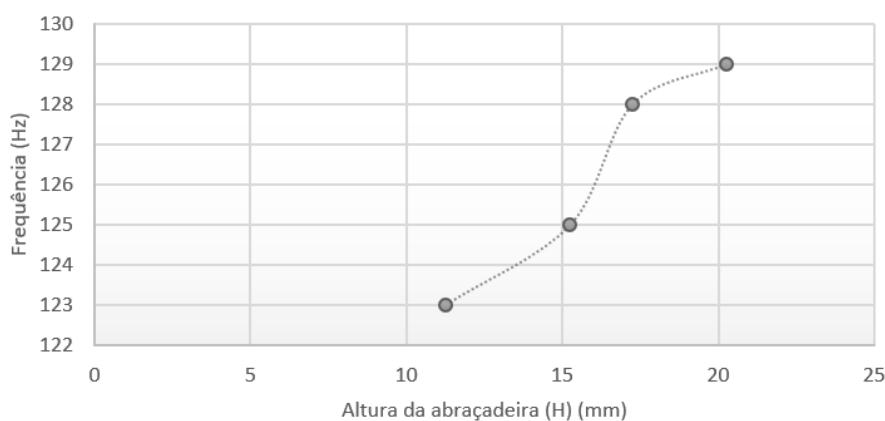


Figura 5.9: Variação da 1ª frequência natural em função da altura da abraçadeira (h)

único parâmetro que se alterava eram as dimensões das barras metálicas e consequentemente a posição das abraçadeiras no tubo. De modo a ter meios de comparação para a análise experimental, simulou-se numericamente os três protótipos.

O primeiro protótipo possui barras com o comprimento de 200mm, e o viscoelástico mede aproximadamente 90mm. No segundo protótipo as barras medem 300mm de comprimento e o viscoelástico cerca de 180mm, e no terceiro protótipo as barras medem 400mm de comprimento e o viscoelástico cerca de 200mm. Dado que o viscoelástico usado foi sempre o mesmo, a sua espessura é de 0,5mm em todos os protótipos, enquanto que a espessura das vigas é de 2mm.

Seguem-se então os modos naturais dos protótipos nas figuras 5.13, 5.14 e 5.15. As tabelas 5.2, 5.3 e 5.4 contém o fator de perda para cada um destes, obtido com recurso ao MSE.

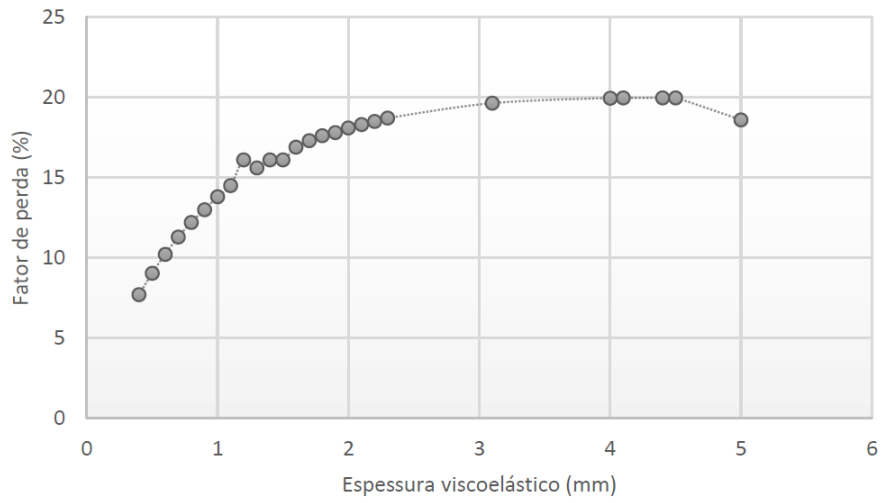


Figura 5.10: Variação do fator de perda em função da espessura do viscoelástico

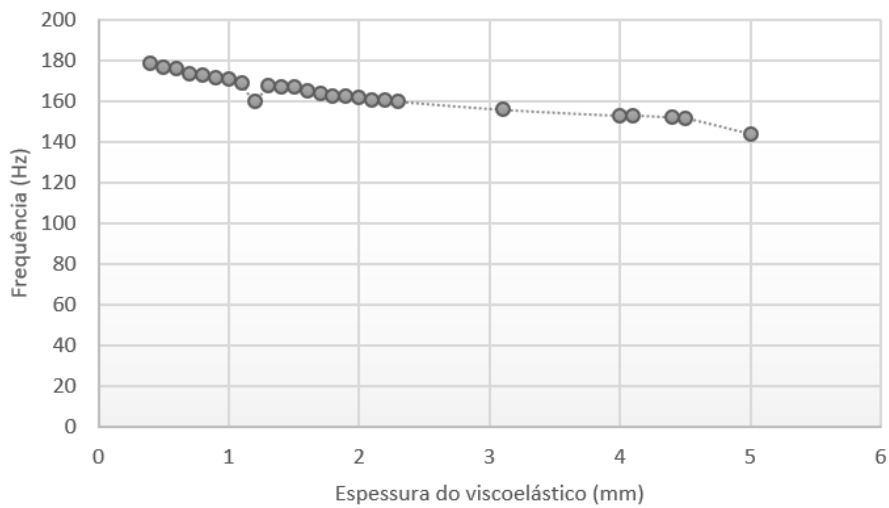


Figura 5.11: Frequência em função da espessura do viscoelástico

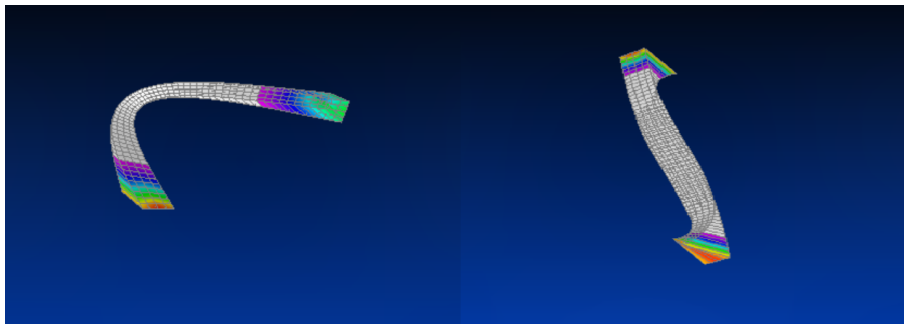


Figura 5.12: Energia de deformação na direção ortogonal

Tabela 5.1: Características dos protótipos criados

Protótipo	Posição x1 (mm)	Posição x2 (mm)	Comprimento viga (C) (mm)
1	300	500	200
2	250	550	300
3	200	600	400

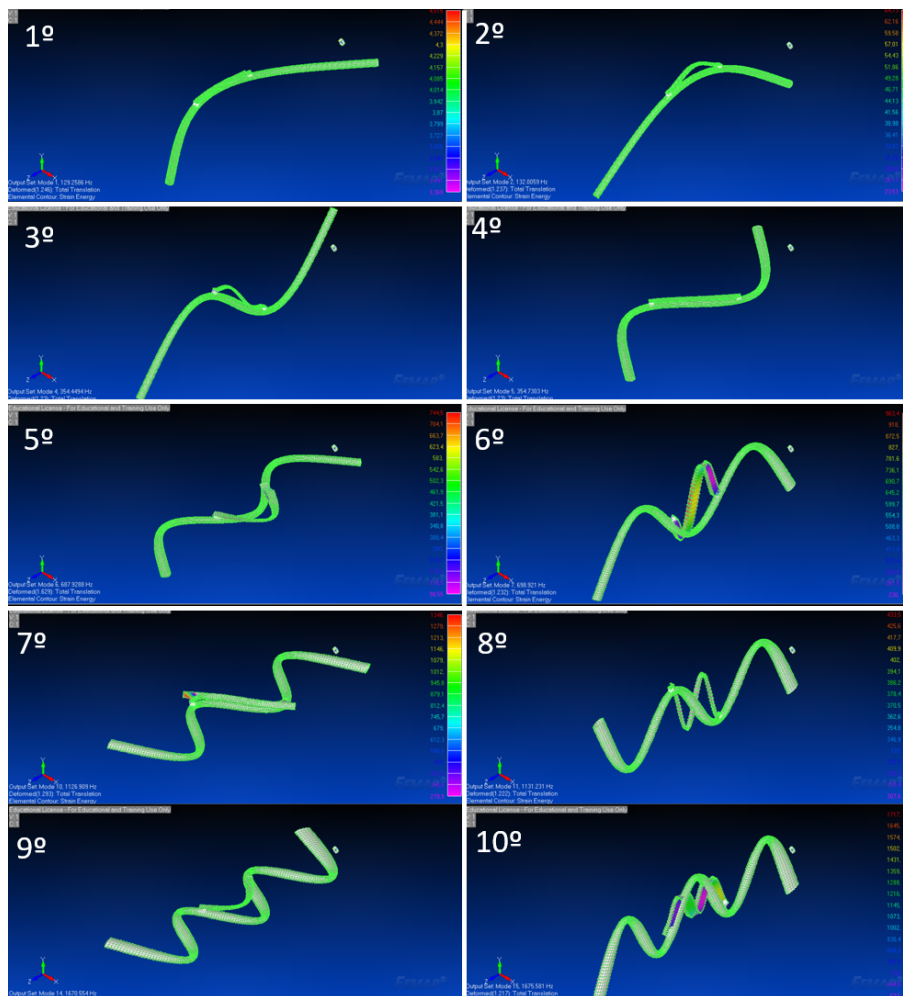


Figura 5.13: Formas modais numéricas do Protótipo 1

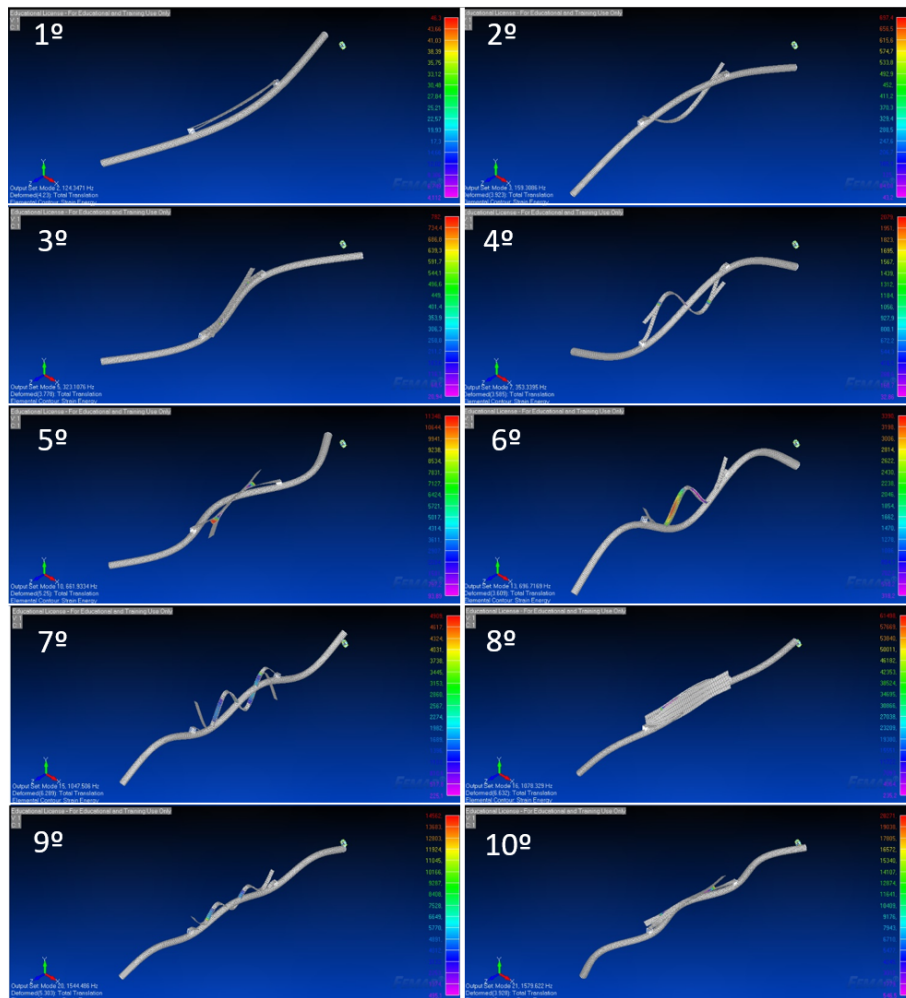


Figura 5.14: Formas modais numéricas do Protótipo 2

Tabela 5.2: Análise numérica Protótipo 1

Modos Natural	Frequência Natural (Hz)	Fator de perda (%)	Forma Modal
1º	129	0,24	Flexão de 1ª ordem plano OXY
2º	132	9,64	Flexão de 1ª ordem plano OXZ
3º	355	0,47	Flexão de 2ª ordem plano OXZ
4º	355	0,11	Flexão de 2ª ordem plano OXY
5º	688	0,64	Flexão de 3ª ordem plano OXY
6º	698	4,90	Flexão de 3ª ordem plano OXZ
7º	1127	1,87	Flexão de 4ª ordem plano OXY
8º	1131	0,36	Flexão de 4ª ordem plano OXZ
9º	1670	0,14	Flexão de 5ª ordem plano OXY
10º	1676	0,88	Flexão de 5ª ordem plano OXZ

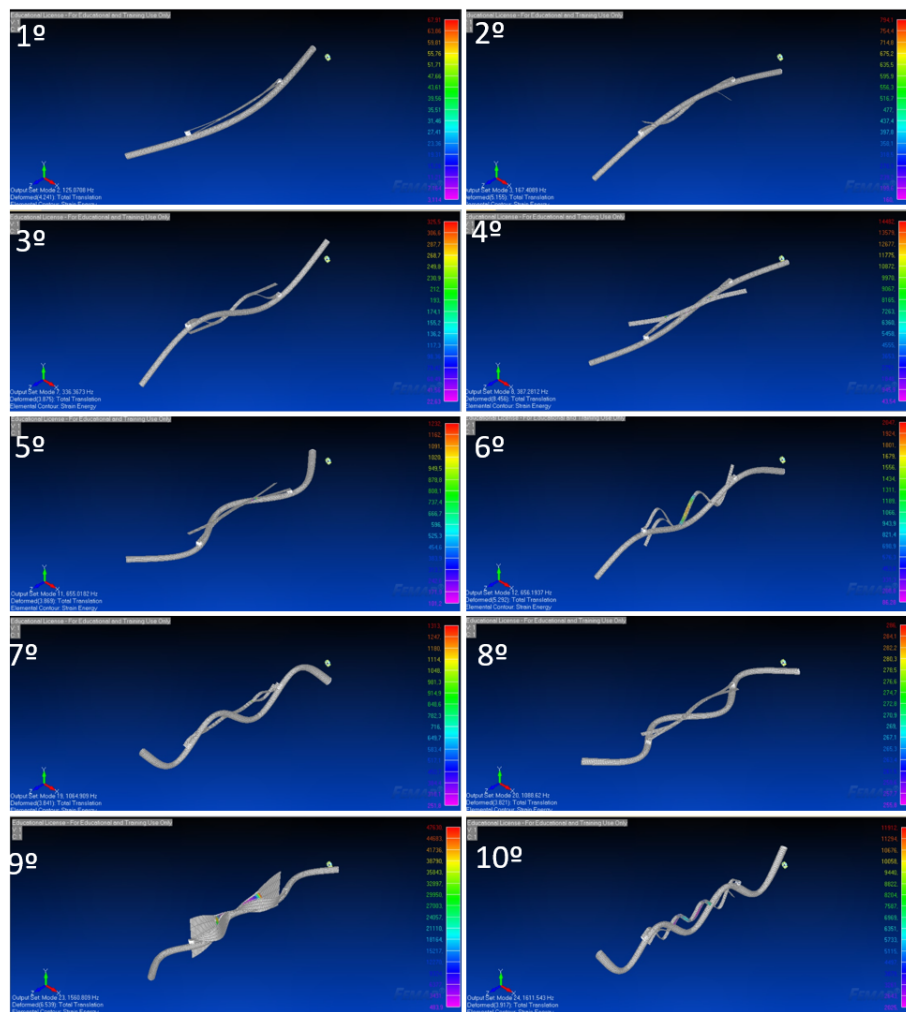


Figura 5.15: Formas modais numéricas do Protótipo 3

Tabela 5.3: Análise numérica Protótipo 2

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Fator de Perda (%)	Forma Modal
1 ^o	124	0,31	Flexão de 1 ^a ordem plano OXY
2 ^o	159	10,75	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	323	0,89	Flexão de 2 ^a ordem plano OXY
4 ^o	353	1,70	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	662	3,47	Flexão de 3 ^a ordem plano OXY
6 ^o	697	3,87	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
7 ^o	1048	1,26	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
8 ^o	1078	3,24	Flexão de 4 ^a ordem plano OXY
9 ^o	1545	1,06	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ
10 ^o	1580	0,96	Flexão de 5 ^a ordem plano OXY

Tabela 5.4: Análise numérica Protótipo 3

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Fator de Perda (%)	Forma Modal
1 ^o	125	0,45	Flexão de 1 ^a ordem plano OXY
2 ^o	167	6,82	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	336	0,18	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	387	6,73	Flexão de 2 ^a ordem plano OXY
5 ^o	655	0,33	Flexão de 3 ^a ordem plano OXY
6 ^o	656	0,03	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
7 ^o	1065	0,01	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
8 ^o	1088	2,04	Flexão de 4 ^a ordem plano OXY
9 ^o	1560	2,04	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ

5.2 Estudo Experimental

Procedeu-se ao estudo experimental utilizando para isso os três protótipos referidos anteriormente, representados na Figura 5.16. Estes diferiam entre si na posição de aplicação das abraçadeiras e comprimento das vigas utilizadas. As abraçadeiras foram coladas ao tubo e as vigas foram acopladas às braçadeiras, utilizando para isso parafusos M4, como ilustrado na Figura 5.17 e na Figura 5.18 encontra-se o sistema pronto a ser estudado.

O viscoelástico aplicado, era da marca 3M, modelo VHB 4905.

No primeiro modelo, o mais pequeno, aplicaram-se as abraçadeiras centradas nos pontos de 300mm e de 500mm.

No segundo modelo criado, centraram-se as abraçadeiras nas coordenadas de 250mm e de 550mm, sendo esta a versão que numericamente oferecia maior amortecimento para o primeiro modo.

No último modelo, aplicaram-se as abraçadeiras nos pontos de 200mm e de 600mm. Os resultados experimentais apresentam-se nas tabelas 5.5, 5.6 e 5.7.

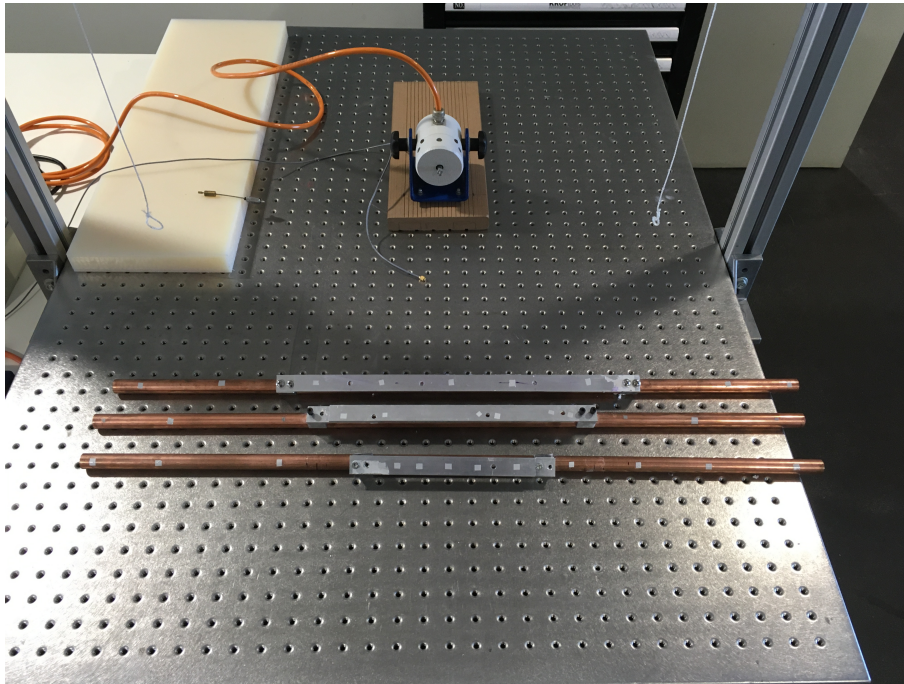


Figura 5.16: Protótipos usados no estudo experimental

Tabela 5.5: Resultados experimentais para o Protótipo 1

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	140	4,23	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	312	0,23	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	764	2,33	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	1010	0,76	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1660	1,17	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ



Figura 5.17: Fixação do Protótipo

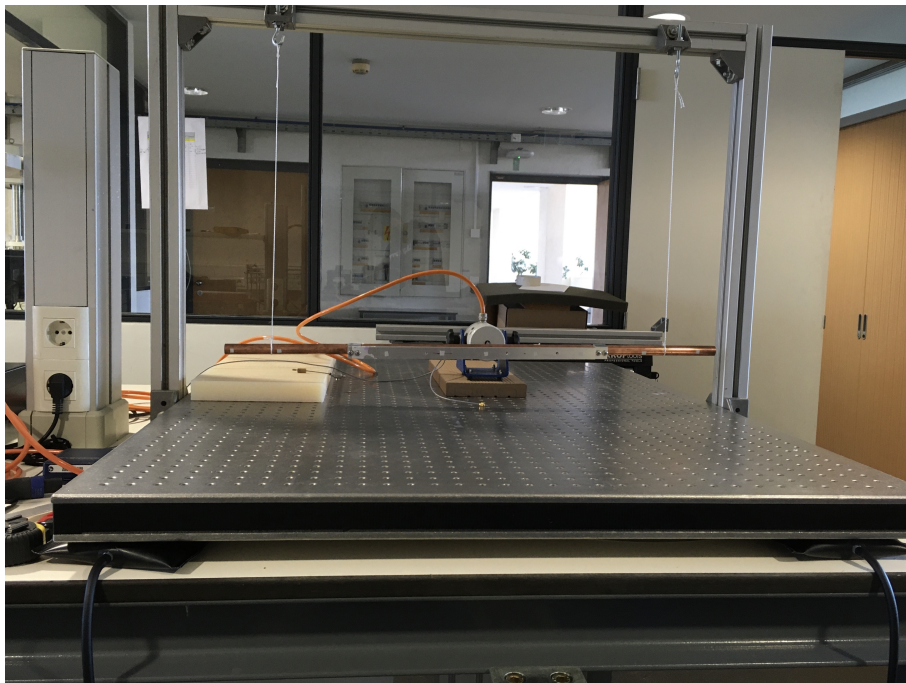


Figura 5.18: Montagem Experimental

Tabela 5.6: Resultados experimentais para o Protótipo 2

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	179	3,85	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	330	1,47	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	729	0,91	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	1030	0,44	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1450	0,41	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ

Tabela 5.7: Resultados experimentais para o Protótipo 3

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	210	0,99	Flexão de 1 ^a ordem plano OXZ
2 ^o	317	0,13	Flexão de 2 ^a ordem plano OXZ
3 ^o	622	0,46	Flexão de 3 ^a ordem plano OXZ
4 ^o	1040	0,17	Flexão de 4 ^a ordem plano OXZ
5 ^o	1640	0,71	Flexão de 5 ^a ordem plano OXZ
6 ^o	1960	1,51	Flexão de 6 ^a ordem plano OXZ

5.2.1 Amortecimento na Direção Ortogonal

Como referido anteriormente, apesar do dispositivo ter sido desenvolvido com vista a providenciar amortecimento apenas numa direção, numericamente verificou-se que havia a possibilidade de existir amortecimento na direção ortogonal e como tal resolveu-se avaliar experimentalmente esta situação, obtendo-se os resultados listados nas tabelas 5.8, 5.9 e 5.10.

Tabela 5.8: Análise experimental Protótipo 1 (direção ortogonal)

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	129	0,40	Flexão de 1 ^a ordem plano OXY
2 ^o	319	0,13	Flexão de 2 ^a ordem plano OXY
3 ^o	674	0,23	Flexão de 3 ^a ordem plano OXY
4 ^o	987	0,21	Flexão de 4 ^a ordem plano OXY
5 ^o	1360	0,11	Flexão de 5 ^a ordem plano OXY
6 ^o	1500	0,10	Flexão de 6 ^a ordem plano OXY

Tabela 5.9: Análise experimental Protótipo 2 (direção ortogonal)

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	137	0,26	Flexão de 1 ^a ordem plano OXY
2 ^o	315	0,23	Flexão de 2 ^a ordem plano OXY
3 ^o	655	0,26	Flexão de 3 ^a ordem plano OXY
4 ^o	1220	0,43	Flexão de 4 ^a ordem plano OXY
5 ^o	1500	0,09	Flexão de 5 ^a ordem plano OXY

Tabela 5.10: Análise experimental Protótipo 3 (direção ortogonal)

Modo Natural	Frequência Natural (Hz)	Amortecimento (%)	Forma Modal
1 ^o	145	0,39	Flexão de 1 ^a ordem plano OXY
2 ^o	327	0,21	Flexão de 2 ^a ordem plano OXY
3 ^o	632	0,18	Flexão de 3 ^a ordem plano OXY
4 ^o	1080	0,23	Flexão de 4 ^a ordem plano OXY
5 ^o	1590	0,26	Flexão de 5 ^a ordem plano OXY

5.3 Análise Económica

Um dos pré-requisitos impostos no início, foi que a solução desenvolvida fosse economicamente viável, como tal procedeu-se ao cálculo dos custos associados à criação de cada um destes dispositivos. As vigas aplicadas foram adquiridas em segmentos de um metro, e cada um deles custou 2,99€. O viscoelástico da 3M, modelo, VHB 4905, utilizado, vende-se em rolos de 33m por aproximadamente 59,34€[52].

Orçamentou-se as abraçadeiras num *site* da especialidade, que maquina peças em CNC (Comando Numérico Computorizado), e obteve-se o preço da abraçadeira de menores dimensões, de 3,89€. Para a abraçadeira de maiores dimensões, o preço foi de 3,93€[53].

Dado que o preço diminuía consoante o número de peças pedido, orçamentaram-se mil unidades de cada (representado no Anexo D).

O preço unitário para parafusos M4 é de 0,06€[54].

Tabela 5.11: Orçamento

Componente	Preço unitário	Protótipo 1	Protótipo 2	Protótipo 3
Parafusos	0,06	0,24	0,24	0,24
Abraçadeira Curta	3,89	3,89	3,89	3,89
Abraçadeira Longa	3,93	3,93	3,93	3,93
Viga	2,99	1,20	1,80	2,40
Viscoelástico	59,34	0,33	0,33	0,33
Total	-	9,59	10,19	10,79

Atendendo à Tabela 5.11 estes preços parecerem exagerados, mas, foram calculados tendo em conta o preço para venda ao público e considerando quantidades bastante baixas. A produção deste artigo em massa originaria preços muito mais reduzidos.

5.4 Comparação e Discussão de resultados

Como se pode comprovar com os resultados obtidos, esta solução funciona e é eficaz. Com a componente numérica, esperava-se que este método fosse mais eficaz do que os até então aplicados no tubo, e o estudo experimental comprovou-o.

Conseguiu-se obter valores de amortecimento na ordem dos 4 % para o primeiro modo.

Esperava-se, numericamente, um maior amortecimento para o segundo protótipo do que para primeiro, pelo menos no primeiro modo, no entanto tal não se verificou. No geral, o primeiro protótipo foi o mais eficaz, e excetuando o segundo modo de flexão, ofereceu valores de amortecimento nos restantes modos superiores a todos os outros protótipos.

Numericamente era previsto que o terceiro protótipo tivesse os piores resultados de amortecimento e verificou-se experimentalmente que era verdade.

Atendendo à massa adicionada, o primeiro protótipo adicionava ao tubo cerca de 65 gramas, o segundo, cerca de 85, e o último modelo, foi o que adicionou a maior massa cerca de 105, como já era expectável devido ao comprimento superior das vigas utilizadas no mesmo. Estatisticamente, estes aumentos de massa refletem-se numa variação de massa de 23,21%, 30,50% e 37,51% para o protótipo 1, 2 e 3, respetivamente. Estes dados podem ser todos consultados na Tabela 5.12.

Avaliando as modificações nas frequências naturais e amortecimento na direção normal à da aplicação, já foi aqui referido que o protótipo 1, no geral, providenciou um maior amortecimento, seguindo-se o 2 e por último o 3. Estas alterações estão ilustradas nas figuras 5.21, 5.22 e 5.23 e ainda no Anexo E na Tabela E.4.

A variação das frequências naturais não seguiu um padrão, mas é possível retirar algumas conclusões. Dado que as frequências naturais variam em função da massa e da rigidez induzida no objeto, para cada modo, tendo em conta que a massa adicionada é constante, assim como a posição das abraçadeiras (no mesmo protótipo) apenas as formas modais vão determinar se é ou não adicionada rigidez ao objeto.

Pode-se verificar que no primeiro modo de flexão, as frequências naturais aumentam para todos os dispositivos (comparando com o tubo simples), o que acontece devido ao dispositivo estar maximizado para este modo. Aqui, o sistema está a trabalhar conforme foi projetado, o tubo deforma-se e o sistema adicionado deforma-se juntamente com ele, o que induz um aumento de rigidez, de amortecimento e de frequências naturais.

No segundo modo de flexão, verifica-se o contrário. As frequências baixaram para todos os dispositivos. Contrariamente ao que acontece no primeiro modo de flexão, aqui o sistema não acompanha a deformação do tubo, como se pode visualizar na Figura 5.19. Assim sendo, o amortecimento vai ser baixo, assim como a rigidez adicionada. Como a massa adicionada é a mesma, as frequências naturais diminuem em comparação com o tubo sem tratamento.

Para os modos seguintes é possível observar que sempre que há uma variação de amortecimento elevada, há um aumento das frequências naturais, e vice-versa. Este facto suporta a teoria anterior e pode-se assim concluir que para os modos onde o dispositivo acompanha a deformação do tubo, este funciona aumentando consideravelmente o amortecimento, assim como a rigidez e consequentemente as frequências naturais. Quando tal não acontece, o amortecimento e a rigidez adicionada ao sistema são reduzidos, o que faz com que, as frequências naturais diminuam.

Na direção ortogonal à da aplicação do dispositivo, como era esperado pela com-

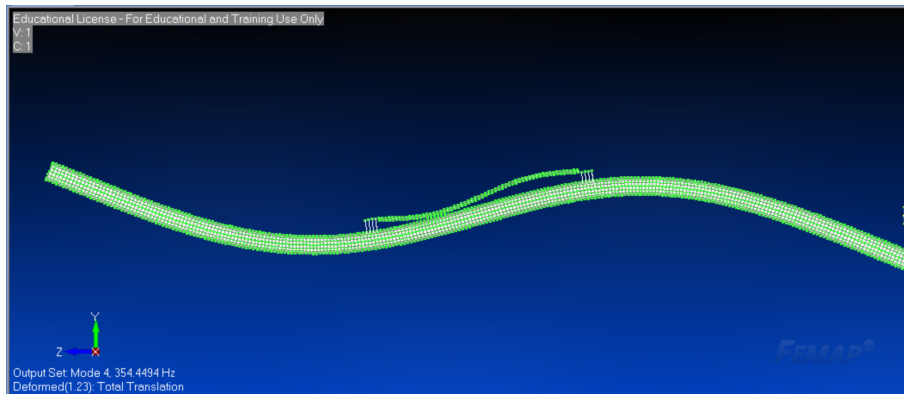


Figura 5.19: Segundo modo de flexão

ponente numérica, o sistema também fornece amortecimento, contudo em muito menor escala. Os resultados não são de todo surpreendentes, mas é possível verificar na Tabela E.5 e nas figuras 5.24, 5.25, 5.26 e ??, que o sistema funciona nesta direção. A variação das frequências naturais são idênticas às obtidas na direção normal e justificam-se exatamente da mesma forma.

Assim conclui-se que, comparando com as outras soluções até então aplicadas, esta tem uma complexidade de montagem ligeiramente superior, no entanto verifica-se que é muito mais eficaz e apresenta-se como uma solução promissora.

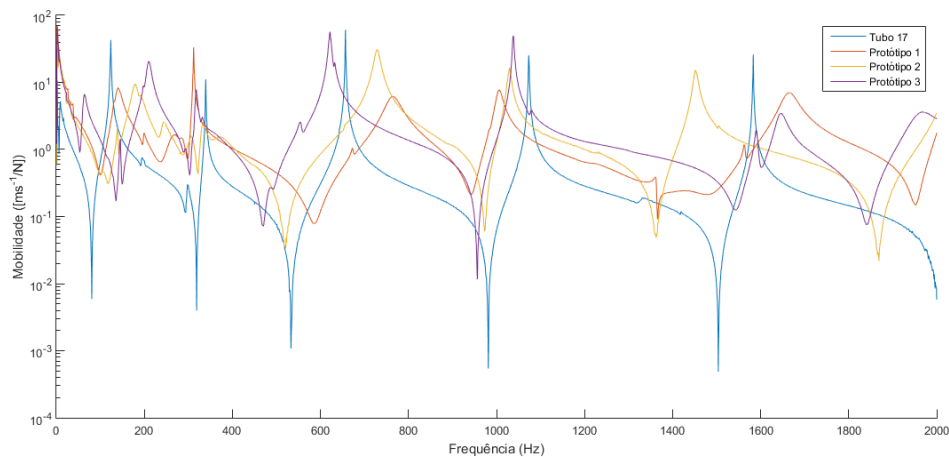


Figura 5.20: FRFs diretas no sentido do dispositivo aplicado

Tabela 5.12: Massa adicionada

Tratamento	Massa Acrescentada (g)	Varição de Massa (%)
Protótipo 1	64,7	23,21
Protótipo 2	84,9	30,50
Protótipo 3	104,61	37,51

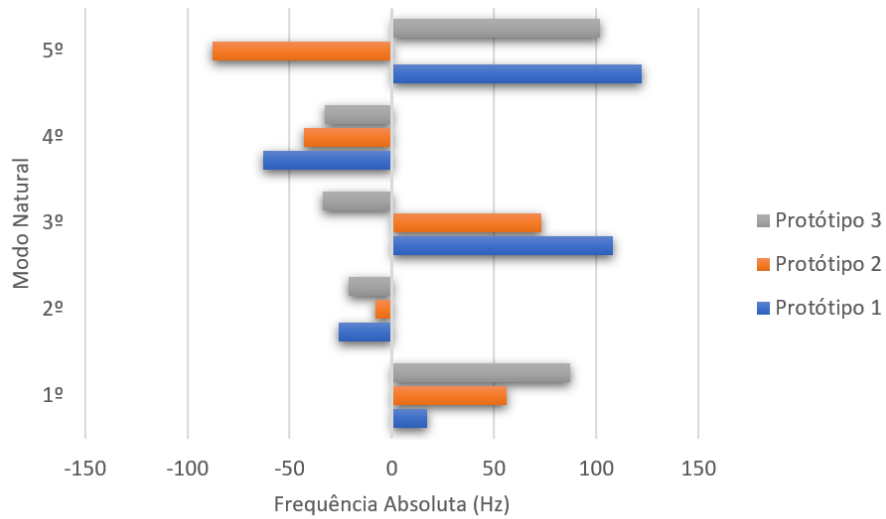


Figura 5.21: Variação absoluta das frequências naturais na direção do plano da face do dispositivo

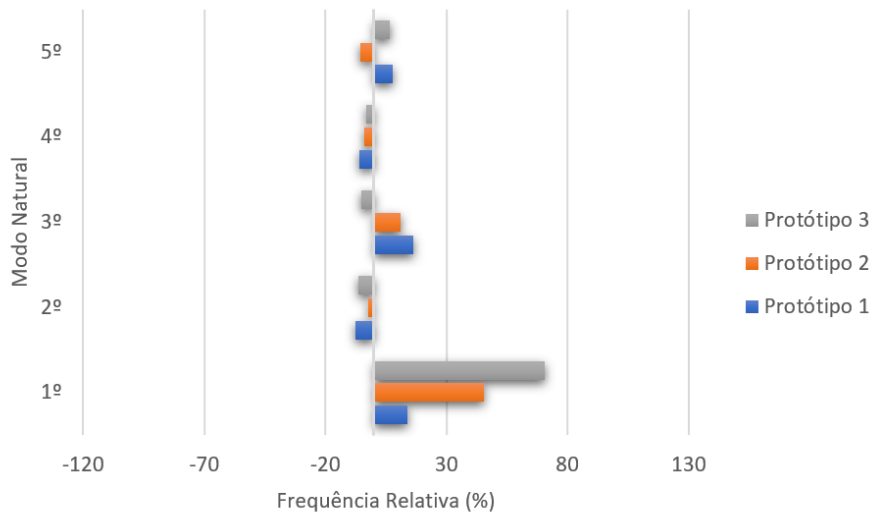


Figura 5.22: Variação relativa das frequências naturais na direção do plano da face do dispositivo

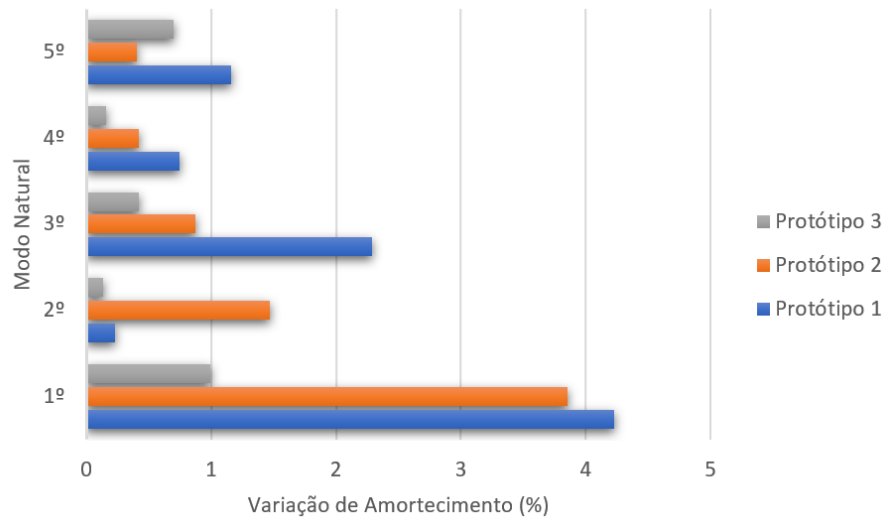


Figura 5.23: Variação do fator de amortecimento modal na direção do plano da face do dispositivo

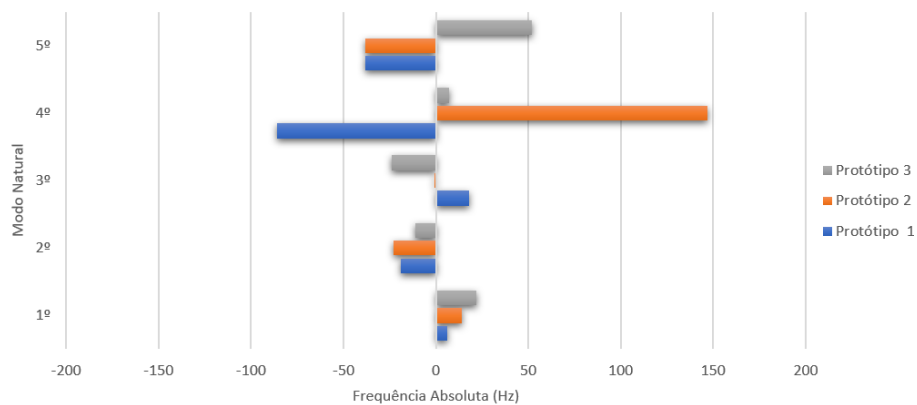


Figura 5.24: Variação absoluta das frequências naturais na direção do plano ortogonal ao da face do dispositivo

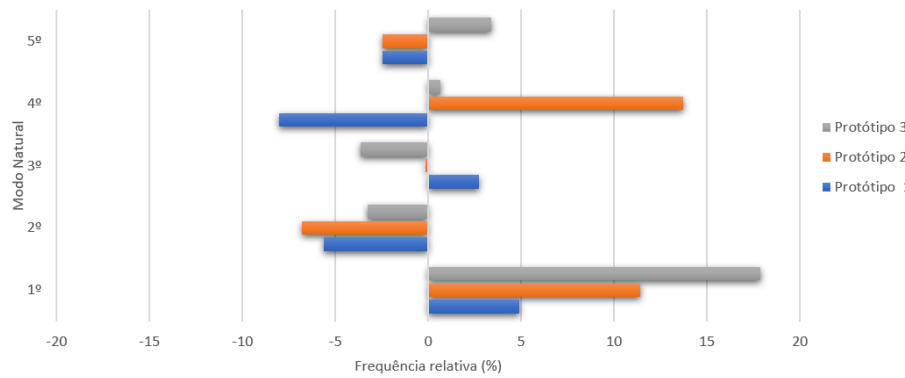


Figura 5.25: Variação relativa das frequências naturais na direção do plano ortogonal ao da face do dispositivo

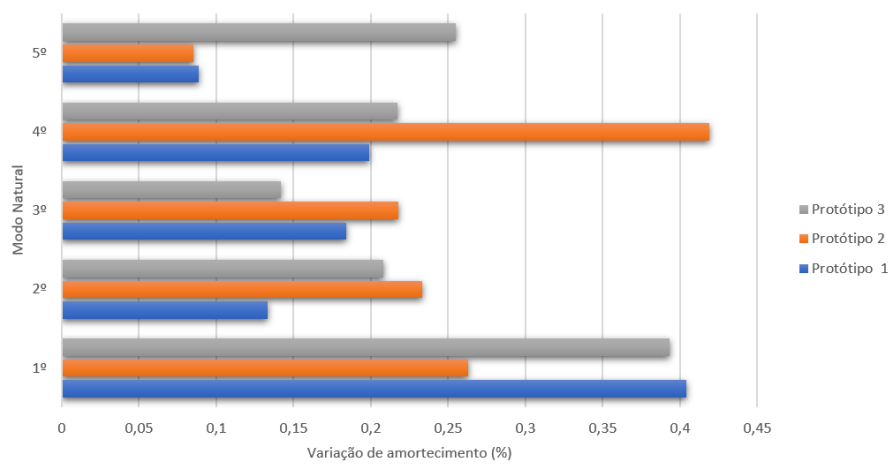


Figura 5.26: Variação do fator de amortecimento modal na direção do plano ortogonal ao da face do dispositivo

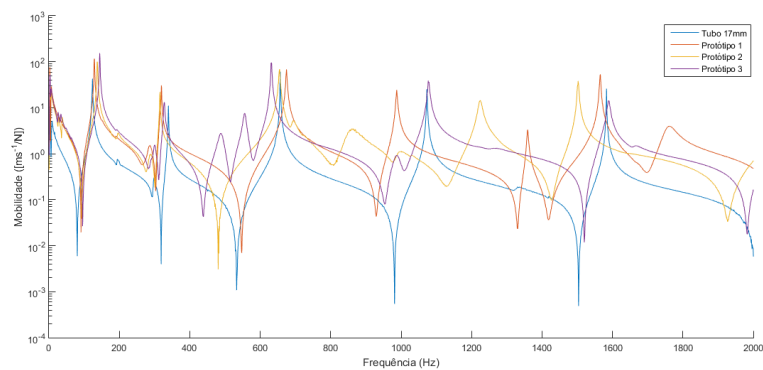


Figura 5.27: FRFs diretas no sentido ortogonal ao do dispositivo aplicado

5.4.1 Comparação do Protótipo 1 com o Tratamento Superficial na Configuração 1

Dado que o tubo tratado com o tratamento da 3M espesso, na configuração 1, com 20mm de largura, foi o que obteve melhores resultados, resolveu-se então comparar com o tratamento híbrido que também ofereceu os melhores resultados. Na Figura 5.28, apresenta-se uma comparação de dois tratamentos com o tubo sem nenhum tratamento. Aqui é possível observar que o protótipo criado oferece um amortecimento bastante superior ao do tratamento superficial que ofereceu os melhores resultados.

Na Figura 5.29 encontra-se um gráfico que compara estes dois tratamentos, mas desta vez tendo em conta a eficiência do amortecimento, ou seja, é o valor de amortecimento dividido pela massa acrescentada de cada tratamento, nos diferentes modos naturais. Neste parâmetro, o tratamento da 3M espesso acaba por ser mais eficiente.

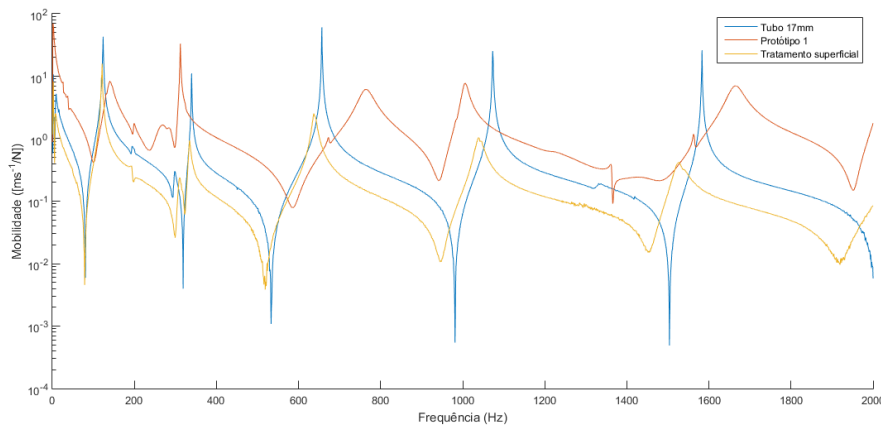


Figura 5.28: Comparação das melhores soluções

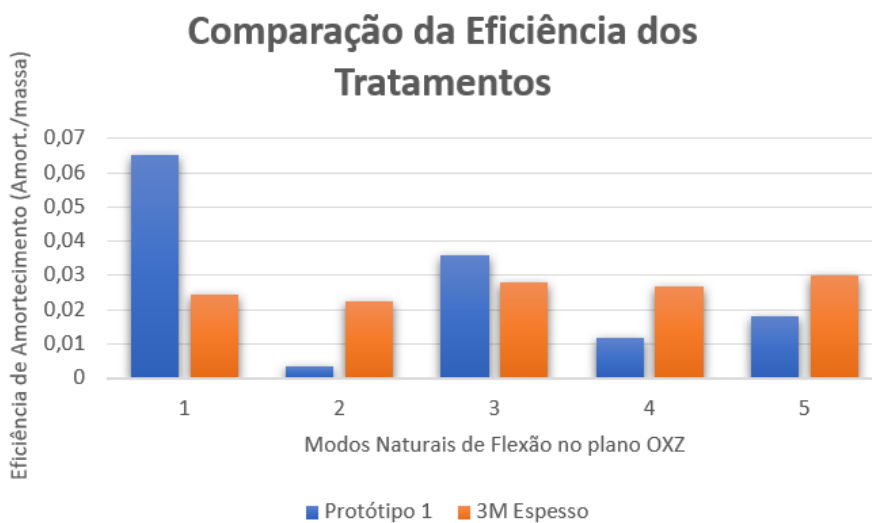


Figura 5.29: Comparação da eficiência dos tratamentos

Capítulo 6

Conclusão

Com a criação do dispositivo híbrido, conseguiu-se cumprir o objetivo principal desta dissertação: reduzir as vibrações nas tubagens dispostas em circuitos típicos de bombas de calor. Conseguiu-se também respeitar todas as condições colocadas pela empresa no desenvolvimento desta solução, e os protótipos criados são de fácil aplicação em ambiente industrial, sendo possível fazer um *retrofit* a bombas de calor já existentes. O preço calculado foi ligeiramente elevado, contudo, é perfeitamente possível conseguir estes protótipos por um preço aceitável, produzindo-os em massa.

Era esperado que os resultados obtidos para as vigas tratadas fossem possíveis de ser extrapolados para os tubos, mas isto não se verificou. Nos ensaios realizados às vigas, grande parte dos tratamentos funcionou e foi possível retirar energia da estrutura base utilizando soluções de amortecimento passivo superficiais.

Quando se realizaram os ensaios nas tubagens, foi possível verificar que não houve um único tratamento de amortecimento passivo, de aplicação superficial, que registasse valores de amortecimento superiores a 1%. Apesar de não se ter conseguido combater o ruído emitido pelas tubagens com esse tipo de tratamentos, foi possível, com esta dissertação, fazer um estudo intensivo da influência desses materiais nas tubagens, onde se obteve uma boa correlação entre os resultados simulados e os experimentais, o que em parte, suporta a veracidade dos resultados demonstrados.

Considerando estes dois estudos, é possível destacar algumas conclusões:

- O tratamento passivo superficial que melhor funcionou, tanto para as tubagens, como para as vigas foi o tratamento espesso da 3M;
- Nenhuma das mangas térmicas aplicadas nas duas geometrias ofereceu resultados de amortecimento satisfatórios;

Por fim, quando finalmente se desenvolveu a solução híbrida, conseguiu-se obter bons resultados e obter valores de amortecimento na ordem dos 4% para a solução testada.

Conclui-se assim, que é de elevada complexidade obter um amortecimento satisfatório para tubos lineares sem a adição de infraestruturas ao sistema. Este remate é suportado com os resultados obtidos no Capítulo 4 que mostram, que apesar dos ganhos chegarem a ser 10938 vezes superiores aos originais, os mesmos fornecem amortecimentos inferiores a 1%.

Para a solução híbrida criada, existem algumas conclusões possíveis de ser tiradas:

- O objeto fornece amortecimento na direção ortogonal àquela onde se encontra aplicado;
- A complexidade de montagem deste dispositivo é superior à dos tratamentos superficiais, contudo, é possível industrialmente desenvolver um dispositivo mais simples de aplicar;
- Teoricamente, os materiais viscoelásticos aumentam o amortecimento em função do aumento da frequência, contudo, este dispositivo funciona com maior eficácia a baixas frequências;
- O dispositivo adiciona valores de massa ligeiramente superiores ao dos tratamentos superficiais;
- As dimensões desta solução híbrida são bastante superiores às das soluções passivas superficiais;
- Economicamente, esta solução é mais onerosa do que as outras aplicadas anteriormente.

Após terem sido analisados estes tópicos serão propostas algumas sugestões para trabalhos futuros.

6.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Apesar de se ter conseguido desenvolver uma solução capaz de fornecer amortecimento às tubagens, pensa-se que este dispositivo requer um estudo mais profundo.

Assim propõe-se que este objeto seja alvo de um estudo mais intensivo, verificando-se experimentalmente a influência da variação de algumas componentes geométricas deste, como a largura das vigas utilizadas e a altura das braçadeiras. Propõe-se também um estudo da influência da variação da espessura do viscoelástico, experimentalmente.

Propõe-se também a possibilidade de criar um dispositivo semelhante, que consiga fornecer um amortecimento idêntico em mais do que uma direção.

Referências Bibliográficas

- [1] Cismasiu C. *Análise de Estruturas 2 - Apontamentos de vibrações mecânicas*. **Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa**. 2010;.
- [2] Simões SCD. *Ruído e vibrações no corpo humano: avaliação de ruído e vibrações LAUAK Portuguesa Industria Aeronáutica, Lda [Tese Mestrado]*. **Instituto Politécnico de Setúbal**; 2014.
- [3] Barbosa MSA. *Ruído e desempenho cognitivo dos professores: um estudo exploratório*. **Universidade do Minho**;.
- [4] Chua KJ, Chou SK, Yang W. Advances in heat pump systems: A review. **Applied energy**. 2010;87(12):3611–3624.
- [5] Schoolscience. **Copper - a vital element**; 2019. Visitado a 2019-09-04. Disponível em: <http://resources.schoolscience.co.uk/CDA/14-16/chemistry/copch0pg4.html>.
- [6] Duarte MV. *Estudo da bomba de calor - Fluidos de trabalho e eficiência energética [Tese Mestrado]*. **Universidade da Beira Interior Engenharia**; 2015.
- [7] Bosch. **O epicentro da Termotecnologia**; Visitado a 2019-10-09. Disponível em: <https://www.bosch.pt/a-nossa-empresa/bosch-em-portugal/aveiro/>.
- [8] Heat N. **Heat Pumps**; Visitado a 2019-10-09. Disponível em: <http://nexusstoves.com/wp-content/uploads/2019/05/heat-pump-diagram.jpg>.
- [9] Modernize. **How Does A Heat Pump Work?**; Visitado a 2019-10-09. Disponível em: <https://modernize.com/wp-content/uploads/2015/09/heat-pump-2.jpg>.
- [10] FlexStrut. **Hydra-Zorb Cushion Clamps**; Visitado a 2019-10-09. Disponível em: <https://www.flexstrut.com/Data/Sites/1/media/hydrazorb2.jpg>.
- [11] do Ambiente AP. **Som, Ruído e Incomodidade**; 2017. Visitado a 2018-02-08. Disponível em: <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=86&sub2ref=529>.
- [12] Moreira RAS. *Análise do Comportamento Dinâmico de Placas com Tratamento Passivo por Amortecimento Viscoelástico [Tese Mestrado]*. **Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**; 1996.

- [13] Loix DIN. **Passive versus active damping devices**; 2017. Visitado a 2019-02-14. Disponível em: <https://micromega-dynamics.com/passive-versus-active-damping-devices/>.
- [14] Silva MdSP. Determinação da frequência natural de eixos utilizando o software excel [Tese para Graduação em Engenharia Mecânica]. **Universidade Estadual Paulista (UNESP)**; (2012).
- [15] Bolina CC. Vibrações: As Frequências Naturais Estimada e Experimental de uma Estrutura. **Blucher Mathematical Proceedings**. 2015;1(1):186 – 194. Disponível em: www.proceedings.blucher.com.br/article-details/vibraes-as-frequncias-naturais-estimada-e-experimental-de-uma-estrutura-11900.
- [16] He J, Fu Zf, Analysis M, Hons JPI. Learn more about Modal Analysis Mathematics for modal analysis Modal analysis methods frequency domain. 2001;.
- [17] Rao S. **Vibrações mecânicas. Tradução de Arlete Simille Marques.**; 2008.
- [18] Siemens. **Simcenter Testlab Modal Analysis: Modification Prediction**; 2019. Visitado a 2019-03-01. Disponível em: <https://community.sw.siemens.com/s/article/simcenter-testlab-modal-analysis-modification-prediction>.
- [19] Avitabile P. Modal space - In our own little world. **Experimental Techniques**. 2015;39(1):3–10.
- [20] Pérez M, Roseiro L, Alcobia C, Amaro A, Neto M. Desenvolvimento de um sistema experimental para a determinação de frequências próprias de vibração. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões ISSN**;1646:7078.
- [21] Teixeira-Dias F, Valente R, Sousa RJA, Cruz JAMdP. **Método dos Elementos Finitos Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia (2ª Edição)**; 2018.
- [22] Gaul L. In: Silva JMM, Maia NMM, editors. **Description of Damping and Applications**. Dordrecht: Springer Netherlands; (1999). p. 409–440. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-011-4503-9_20.
- [23] Siemens. **How to calculate damping from a FRF?**; 2019. Visitado a 2019-09-01. Disponível em: <https://community.sw.siemens.com/s/article/how-to-calculate-damping-from-a-frf>.
- [24] Baz AM. **Active and Passive Vibration Damping**; 2018.
- [25] Coelho JMFM. Controlo Passivo de Vibrações de uma Serra Circular por Aplicação de Tratamentos Viscoelásticos : Modelação e Análise [Tese Mestrado]. **Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**; 2011.
- [26] Moreira RAS. Modelação e Análise de Tratamentos Viscoelásticos Multi-camada para Controlo Passivo de Vibrações [Tese Douturamento]. **Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**; 2004.

- [27] Barbero EJ. **Multifunctional Composites**. No. v. 1 in Multifunctional Composites Series. CreateSpace Independent Publishing Platform; 2015.
- [28] Automotive Applications of Active Vibration Control. **Vibration Control**. 2012;(February).
- [29] Hermanrud OC. Active and passive damping systems for vibration control of metal machining equipment [Tese Mestrado]. **Norwegian University of Science and Technology**; 2017.
- [30] Bhise AR, Desai RG, Yerrawar R, Mitra A, Arakerimath R. Comparison between passive and semi-active suspension system using matlab/simulink. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**. (2016);13(4):1–6.
- [31] Thomas EV. Pipe wall shear damping treatment. **United States Patent**. 1970;p. 2–4.
- [32] Mountable R, Covering P. Readily mountable pipe covering. **United States Patent**. 1957;p. 1–5.
- [33] House JRC. Damping treatment for pipes and bodies. **United States Patent**. 1990;(19).
- [34] Renugadevi R, Rajkumar V, A RK. Modelling And Analysis Of Damping Effect in Exhaust System Using Ansys. **International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering**. 2016;3(5):38–43.
- [35] Research and applications of viscoelastic vibration damping materials: A review. **Composite Structures**. 2016;136:460–480.
- [36] Rao MD. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes. **Journal of Sound and Vibration**. 2003;262(3):457–474.
- [37] Teng TL, Hu NK. Analysis of damping characteristics for viscoelastic laminated beams. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**. 2001;190(29-30):3881–3892.
- [38] Tsai MH, Chang KC. A Study On Modal Strain Energy Method For Viscoelastically Damped Structures. **Journal of the Chinese Institute of Engineers**. (2001);.
- [39] Siemens. **Modal Tips: Roving Hammer versus Roving Accelerometer**; 2019. Visitado a 2019-09-20. Disponível em: <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Testing-Knowledge-Base/Modal-Tips-Roving-Hammer-versus-Roving-Accelerometer/ta-p/378619>.
- [40] Polytec. **OFV-5000 Modular Vibrometer**; 2019. Visitado a 2019-05-03. Disponível em: <https://www.polytec.com/eu/vibrometry/products/single-point-vibrometers/ofv-5000-modular-vibrometer/>.
- [41] ME'Scope. **Visual Modal ProTM**; 2019. Visitado a 2019-09-03. Disponível em: <https://www.vibetech.com/solutions/visual/mescope-visual-modal-pro/>.

- [42] Me'scope. **Operating Manuals**; Visitado a 2019-03-20. Disponível em: <http://vibetech@vtis.vibetech.com/manuals/2.%20ME%27scope%20Window.pdf>.
- [43] Dimitrijević J. Complex mode indicator function to find repeated roots or closely coupled modes. **Scientific-Technical Review**. (2005);p. 3–4.
- [44] Amesweb. **MODULUS OF ELASTICITY FOR METALS**; Visitado a 2019-10-09. Disponível em: <https://www.amesweb.info/Materials/Modulus-of-Elasticity-Metals.aspx>.
- [45] MatWeb. **Aluminum 6061-T6; 6061-T651**; 2019. Visitado a 2019-03-04. Disponível em: <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b8d536e0b9b54bd7b69e4124d8f1d20a&ckck=1>.
- [46] Cellpack. **SR2, SRH2**; Visitado a 2019-03-20. Disponível em: <https://ep-webcatalog.cellpack.com/detail/D1;jsessionid=5F01896ECF4B9A94EDC041F411866EB6?RecordId=R130&side=Gesamtsortiment&tab=1>.
- [47] 3M. **Operating Manuals**; Visitado a 2019-03-20. Disponível em: <https://multimedia.3m.com/mws/media/1173170/3mtm-scotchdamptm-vibration-434.pdf>.
- [48] Hellermannntyton. **Heat Shrinkable Tubing 2:1 - Elastomer : SE28 3.2/1.6**; Visitado a 2019-03-20. Disponível em: <https://www.hellermannntyton.com/products/heat-shrink-tubing/se28-3.2-1.6/342-20000>.
- [49] Hellermannntyton. **Heat Shrinkable Tubing 3:1 adhesive lined on a reel : TAN32-19/6**; Visitado a 2019-03-20. Disponível em: <https://www.hellermannntyton.com/products/heat-shrink-tubing/tan32-19-6/318-60013>.
- [50] Hellermannntyton. **Heat shrinkable tubing 6:1, adhesive lined in 1.2 m cuts : HA67-33.0/5.5**; Visitado a 2019-03-20. Disponível em: <https://www.hellermannntyton.com/products/heat-shrink-tubing/ha67-33.0-5.5/321-30100>.
- [51] Hellermannntyton. **Heat shrinkable tubing adhesive lined : EPS-300-3/1**; Visitado a 2019-03-20. Disponível em: <https://www.hellermannntyton.com/products/heat-shrink-tubing/eps-300-3-1/340-03010>.
- [52] TME-Eletric Components. **3M VHB 4905**; Visitado a 2019-10-09. Disponível em: <https://www.tme.eu/en/details/3m-4905-19-33/fixing-tapes/3m/vhb-4905/>.
- [53] Hubs D. **New Quote-CNC machining**; Visitado a 2019-10-09. Disponível em: <https://www.3dhubs.com/manufacture/?technology=cnc-machining>.
- [54] PTROBOTICS. **Screw M4 8mm Pozidriv**; Visitado a 2019-10-09. Disponível em: <https://www.ptrobotics.com/parafusos/6424-screw-m4-8mm-pozidriv.html>.

Anexo A

Funções FRF (Magnitude)

Na Tabela A.1 encontram-se as coordenadas do ponto de medição e de excitação em milímetros que permitiram determinar as FRF diretas.

Tabela A.1: Coordenadas	
Figura	Coordenada do ponto (X ; Y ; Z)
A.1	200 ; 0 ; 0
A.2	200 ; 0 ; 0
A.3	200 ; 0 ; 0
A.4	200 ; 0 ; 0
A.5	200 ; 0 ; 0
A.6	200 ; 0 ; 0
A.7	440 ; 0 ; 0
A.8	560 ; 0 ; 0
A.9	240 ; 0 ; 0
A.10	440 ; 0 ; 0
A.11	440 ; 0 ; 0
A.12	440 ; 0 ; 0
A.13	440 ; 0 ; 0
A.14	440 ; 0 ; 0
A.15	440 ; 0 ; 0
A.16	440 ; 0 ; 0
A.17	440 ; 0 ; 0
A.18	440 ; 0 ; 0
A.19	440 ; 0 ; 0
A.20	440 ; 0 ; 0
A.22	440 ; 0 ; 0
A.23	440 ; 0 ; 0
A.24	440 ; 0 ; 0
A.25	440 ; 0 ; 0
A.26	440 ; 0 ; 0
A.27	440 ; 0 ; 0

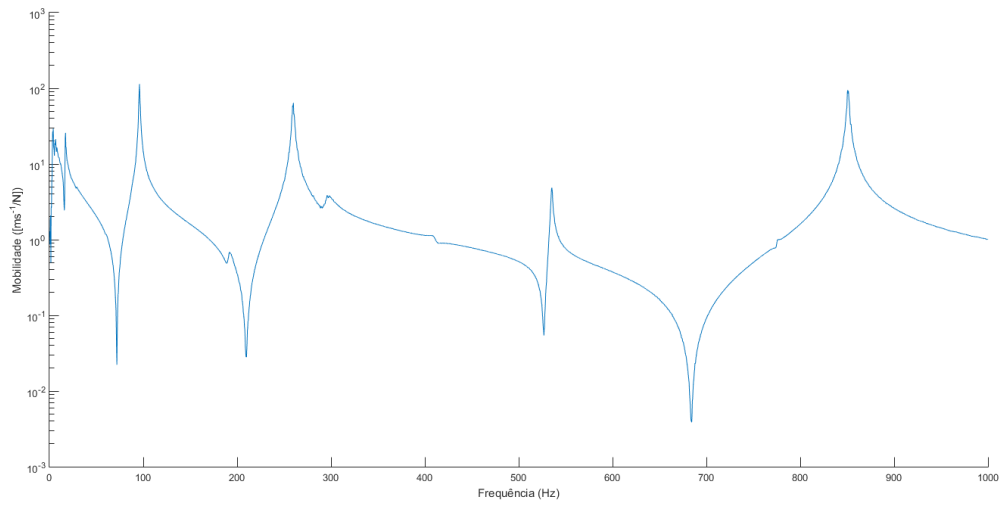


Figura A.1: Função FRF direta da Viga de 25mm

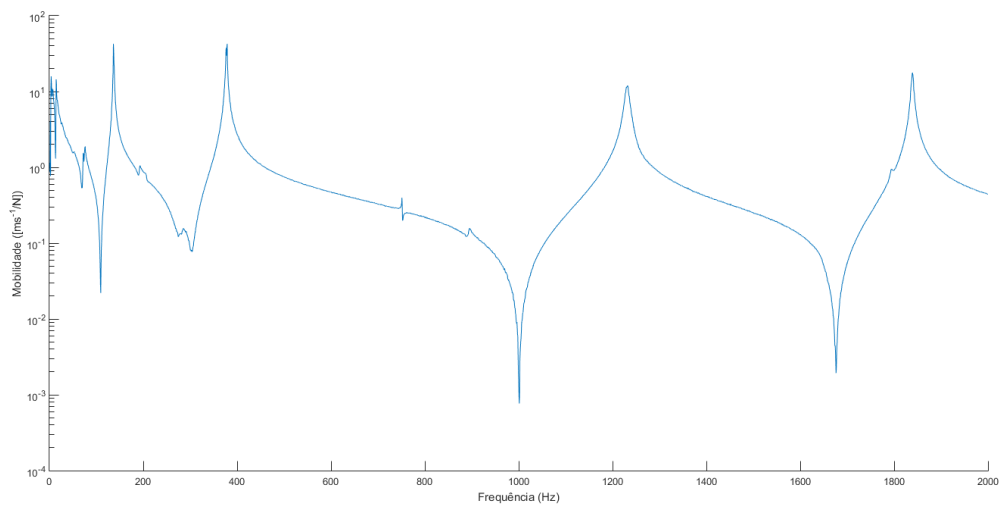


Figura A.2: Função FRF direta da Viga de 30mm

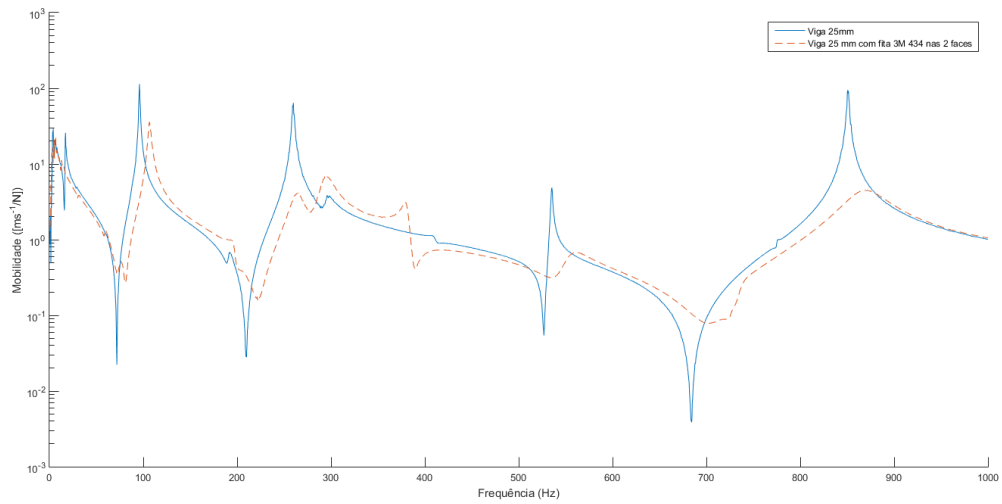


Figura A.3: Função FRF direta da Viga de 25mm com Tratamento da 3M 434

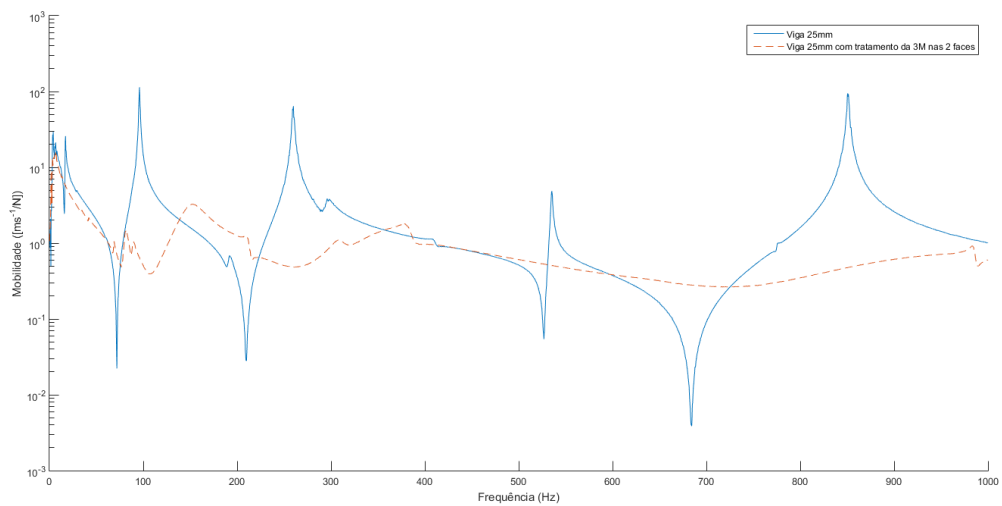


Figura A.4: Função FRF direta da Viga de 25mm com tratamento da 3M espesso

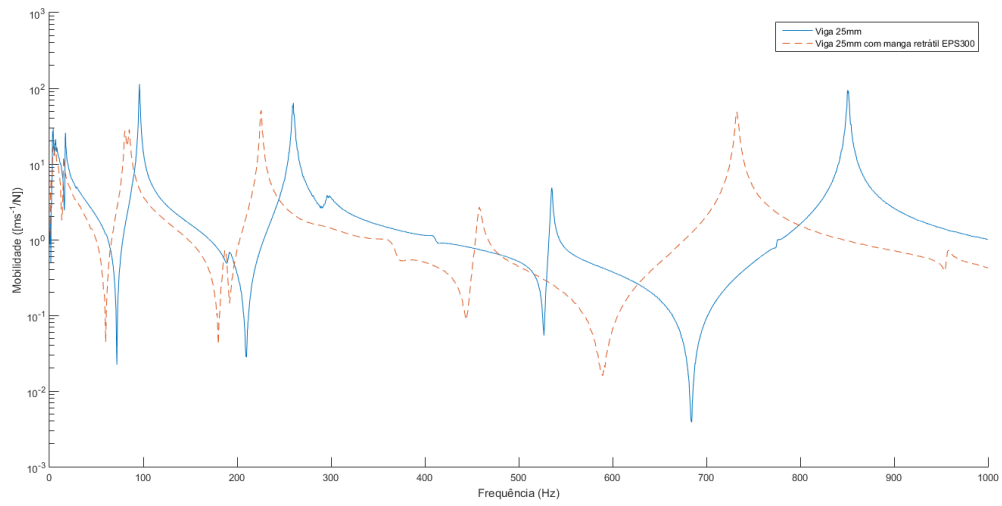


Figura A.5: Função FRF direta da Viga de 25mm com manga térmica HellermannTyton

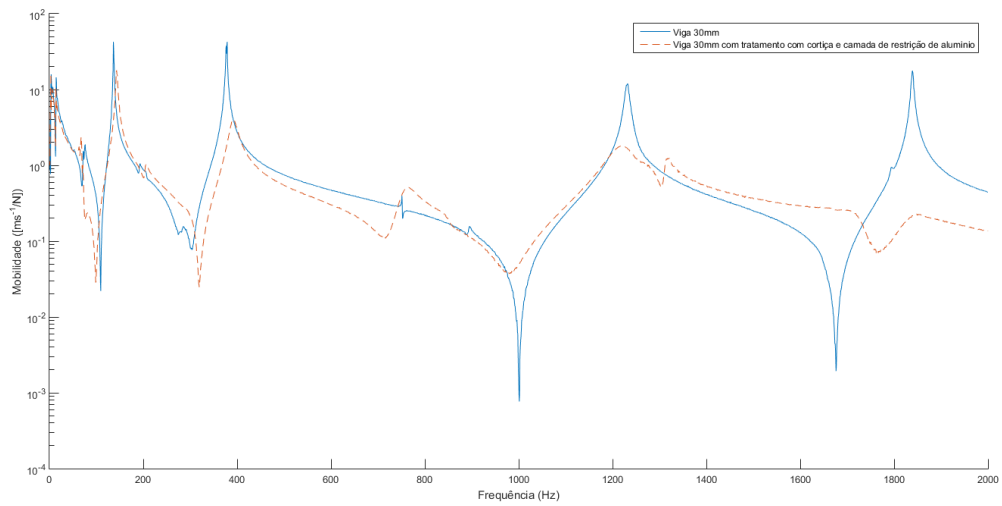


Figura A.6: Função FRF direta da Viga de 25mm com Cortiça e Alumínio

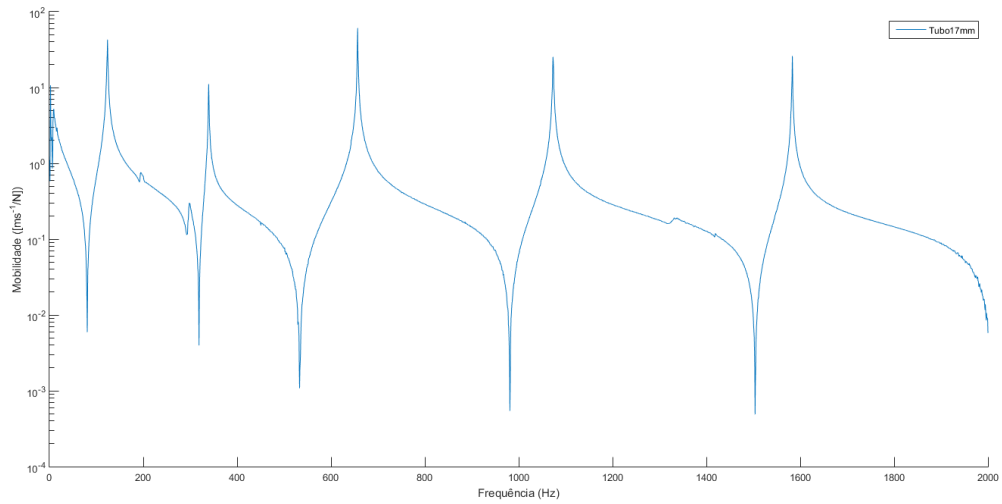


Figura A.7: Função FRF direta tubo 17mm (Tipo1)

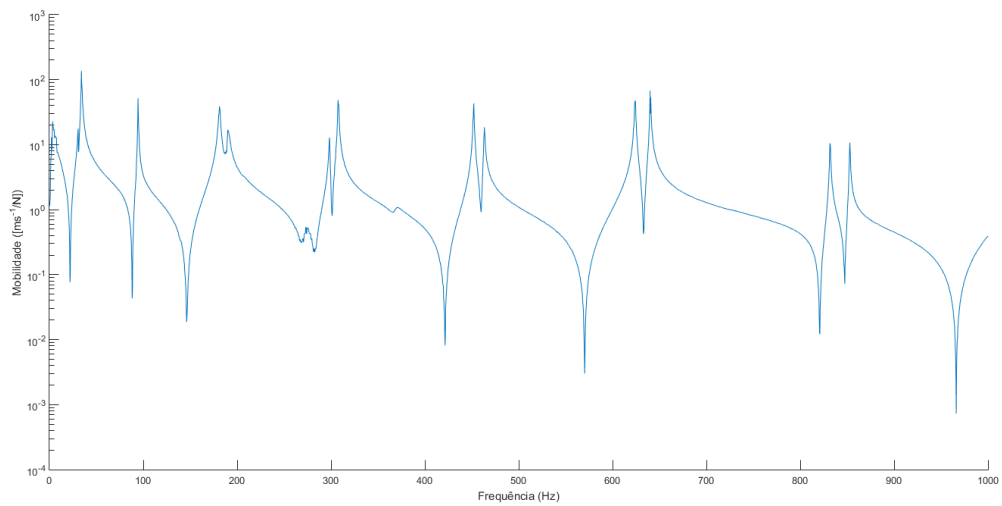


Figura A.8: Função FRF direta tubo 10mm (Tipo2)

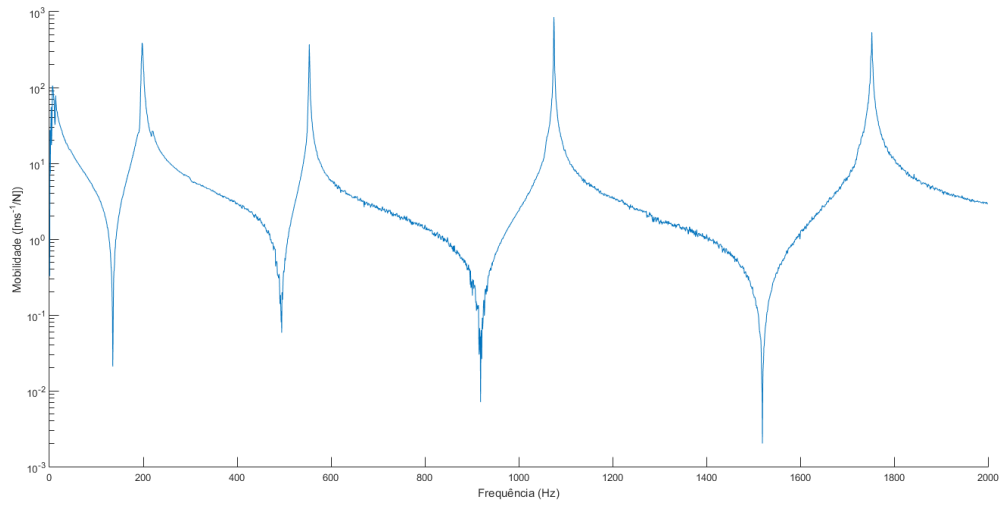


Figura A.9: Função FRF direta tubo 9,5mm (Tipo3)

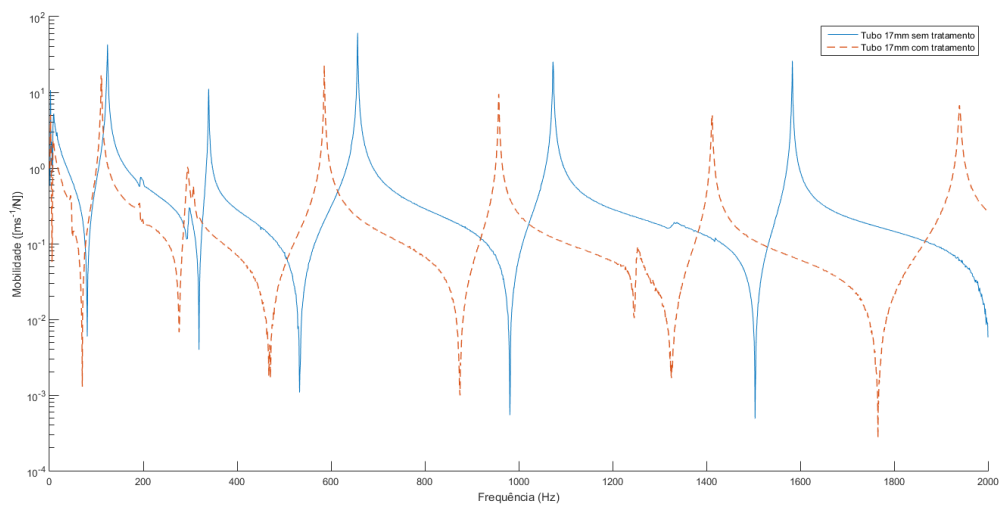


Figura A.10: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com manga retrátil Cellpack SR2

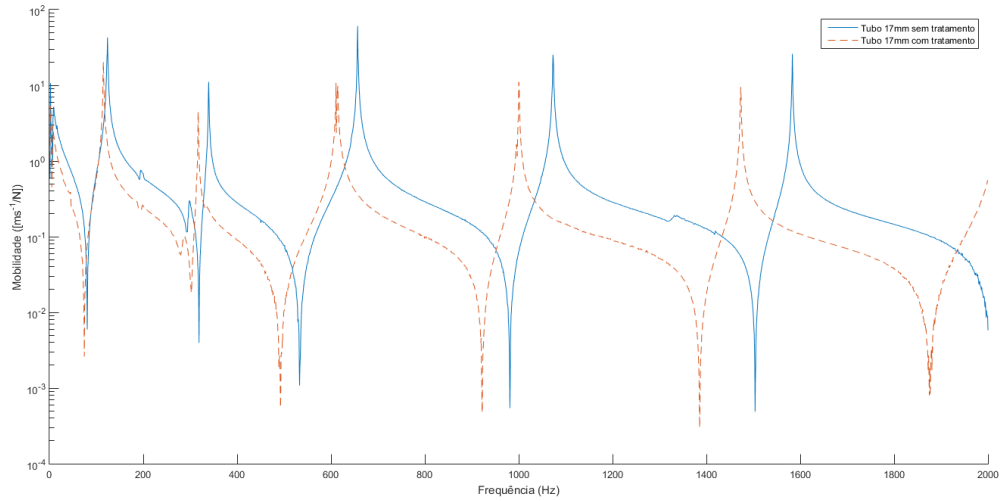


Figura A.11: Função FRF direta do tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com manga retrátil HellermannTyton SE28

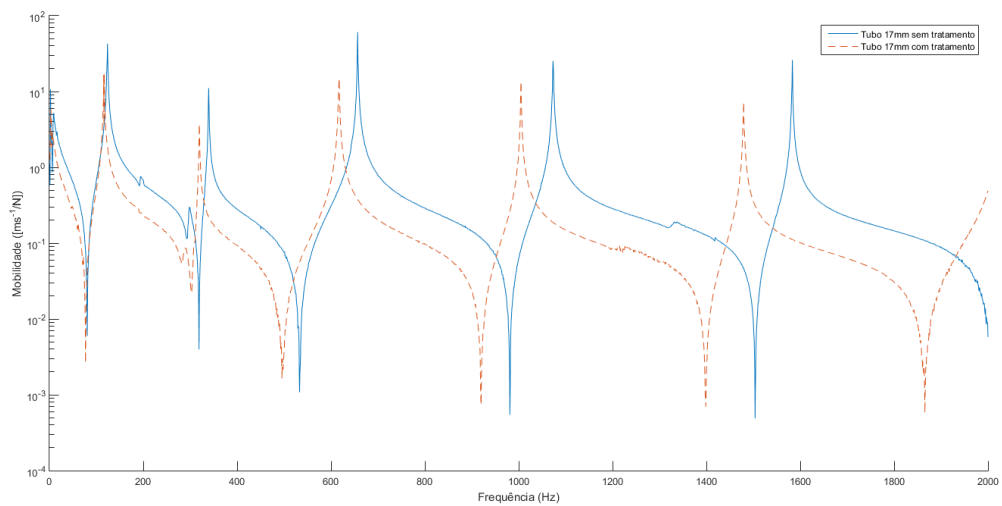


Figura A.12: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com manga retrátil HellermannTyton EPS300

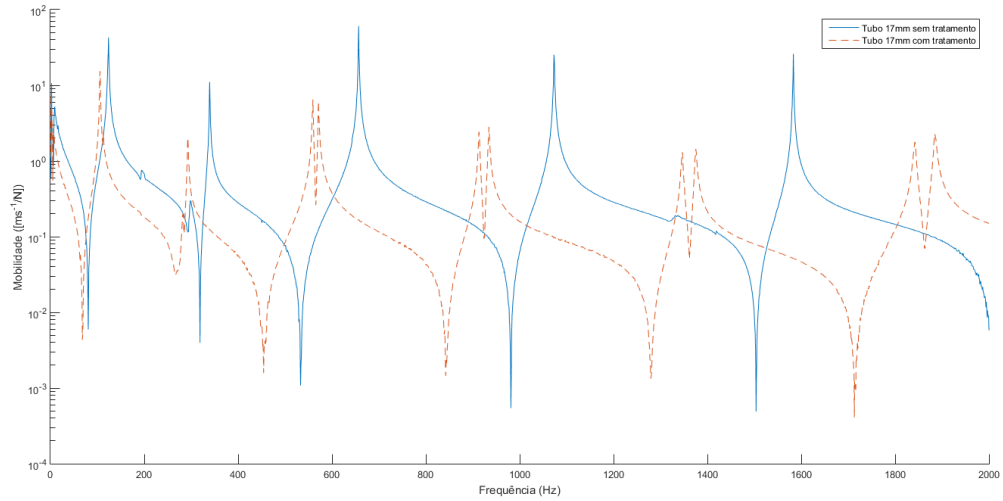


Figura A.13: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com manga retrátil HellermannTyton HA67

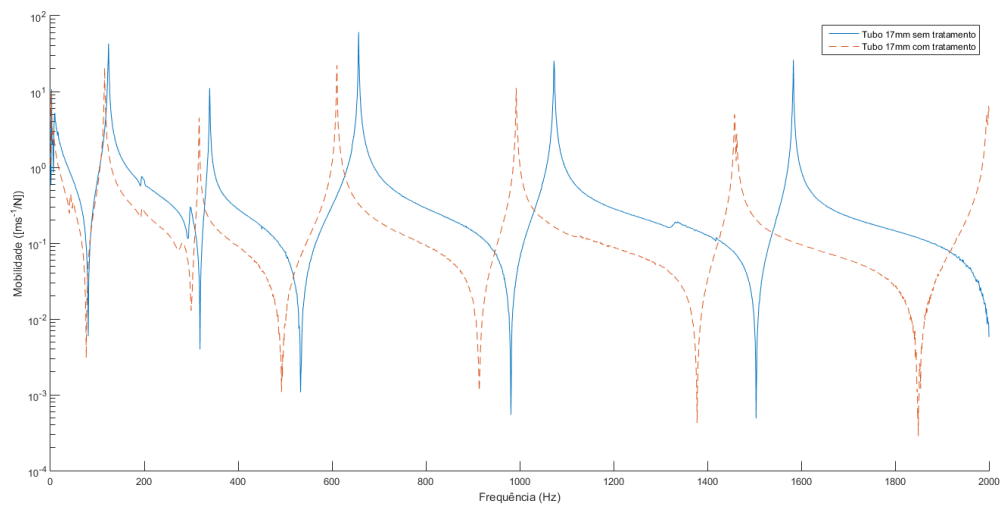


Figura A.14: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com manga retrátil HellermannTyton TAN32

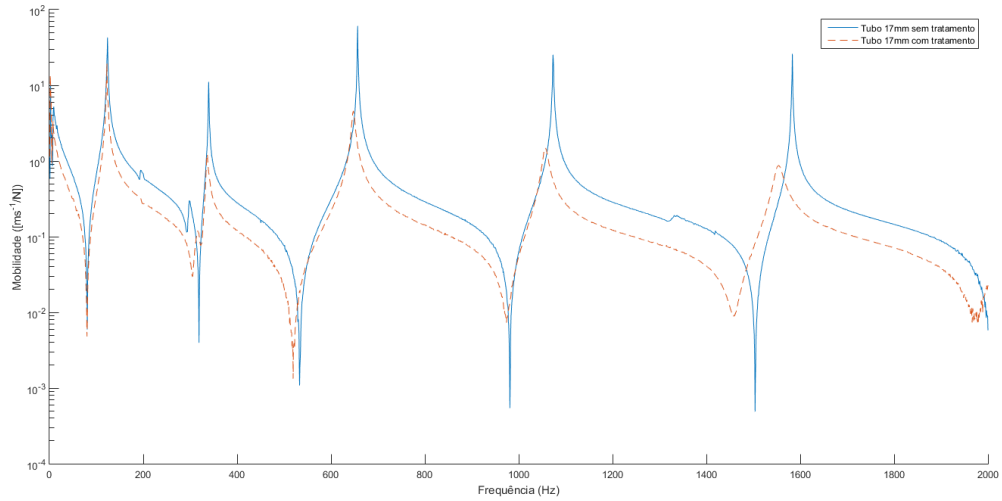


Figura A.15: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com Tratamento 3M na configuração 1

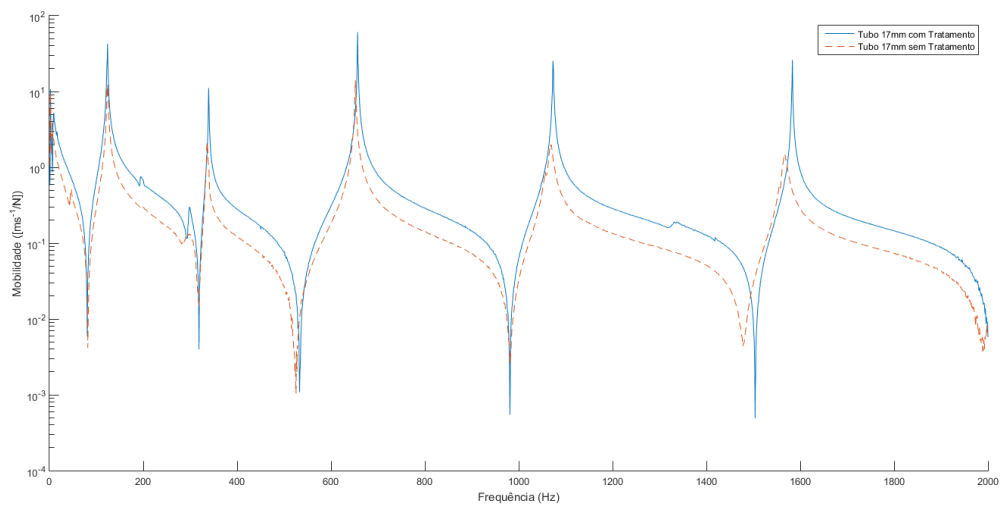


Figura A.16: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com Tratamento 3M na configuração 2

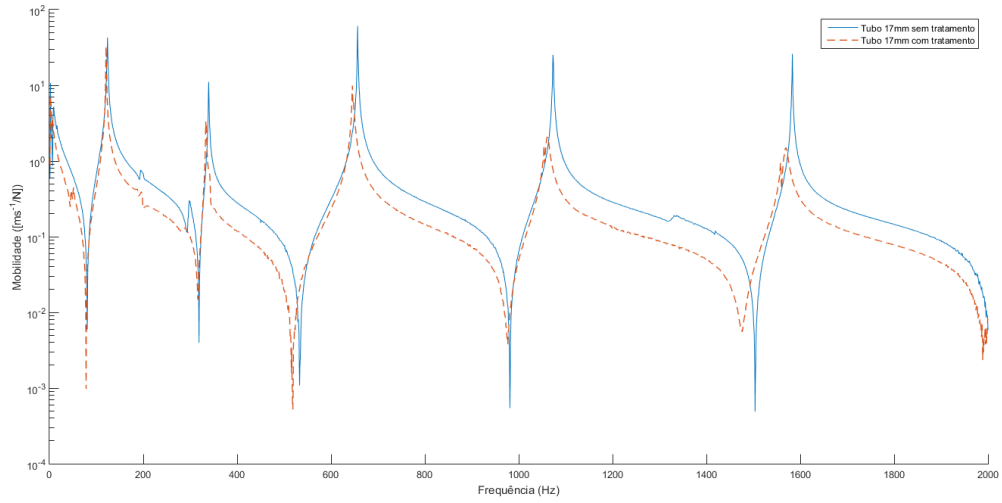


Figura A.17: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com Tratamento 3M na configuração 3

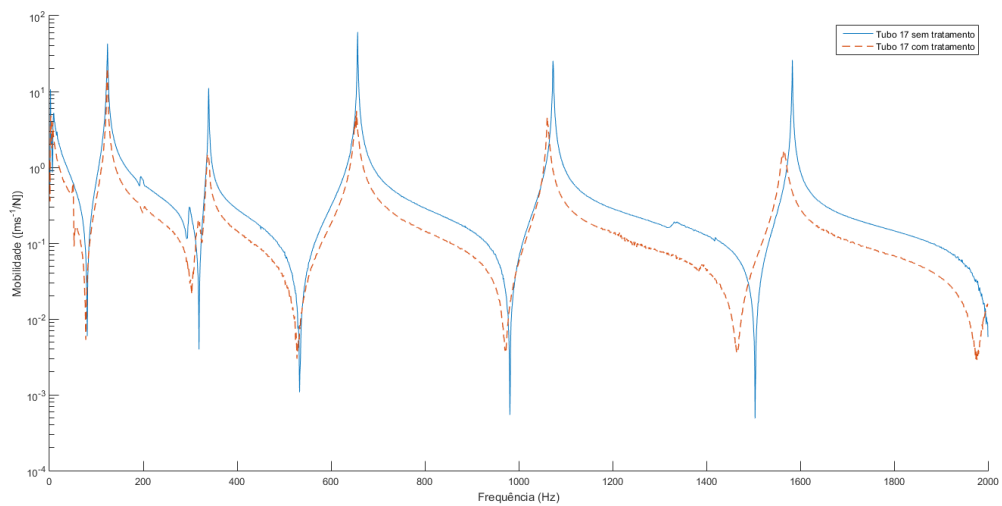


Figura A.18: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta do tubo com Tratamento 3M na configuração 4

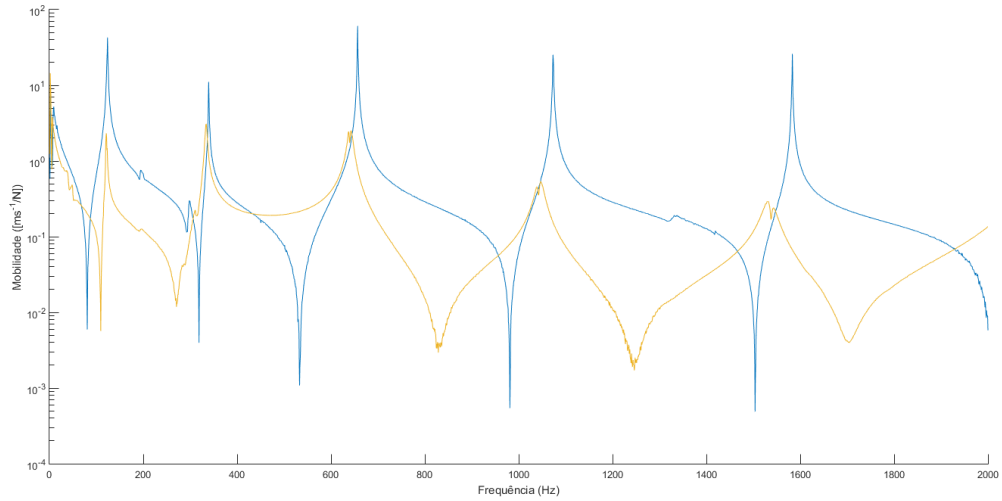


Figura A.19: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta tubo com Tratamento 3M na configuração 1 com o dobro da espessura inicial

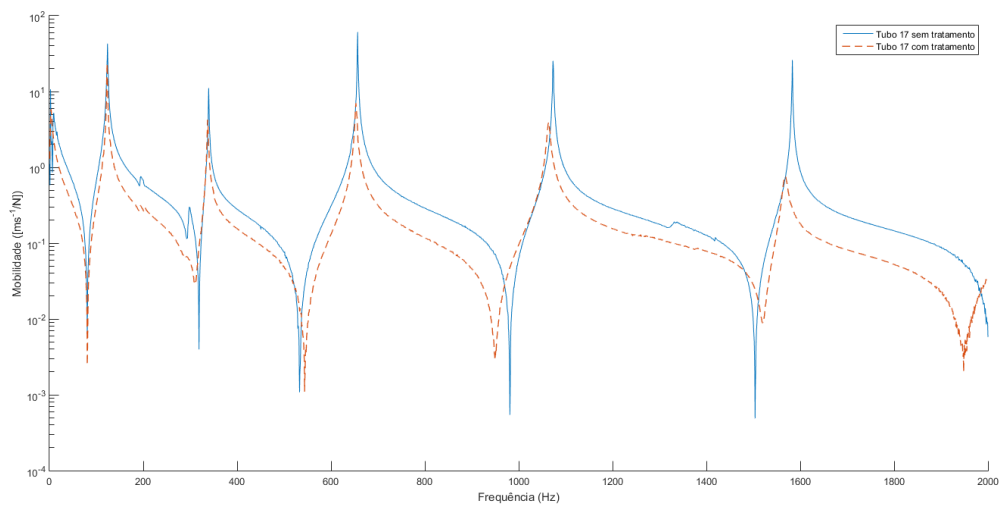


Figura A.20: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta tubo com Tratamento 3M na configuração 1 com cortiça e alumínio

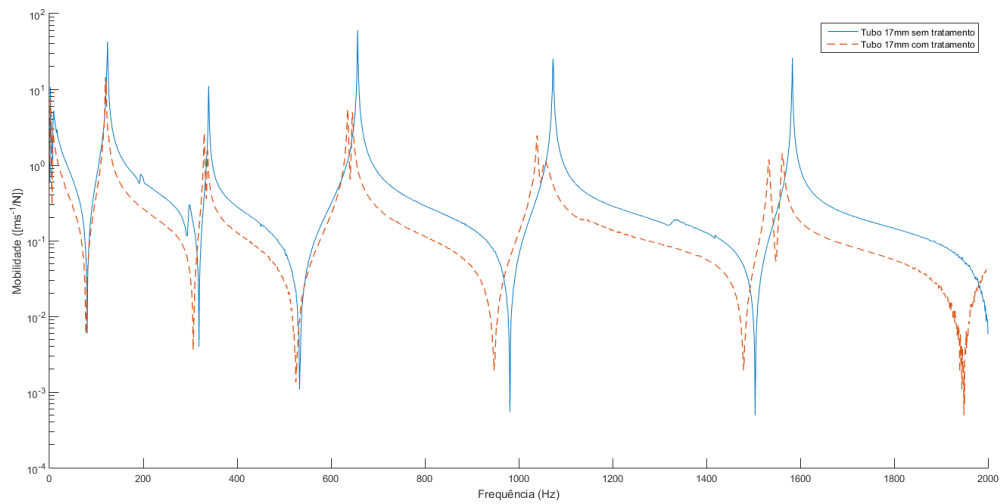


Figura A.21: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF direta tubo com Tratamento de cortiça com camada de restrição em alumínio em espiral

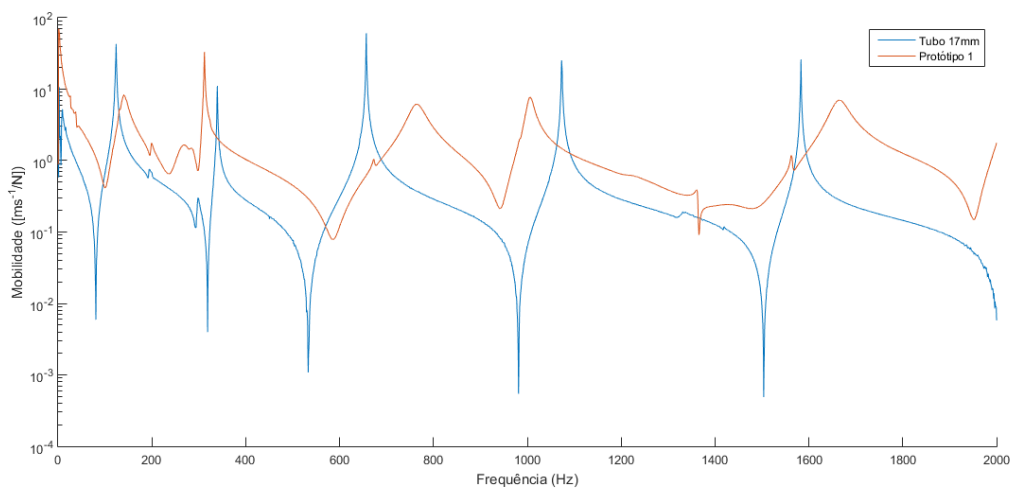


Figura A.22: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF do Tubo com o Protótipo 1

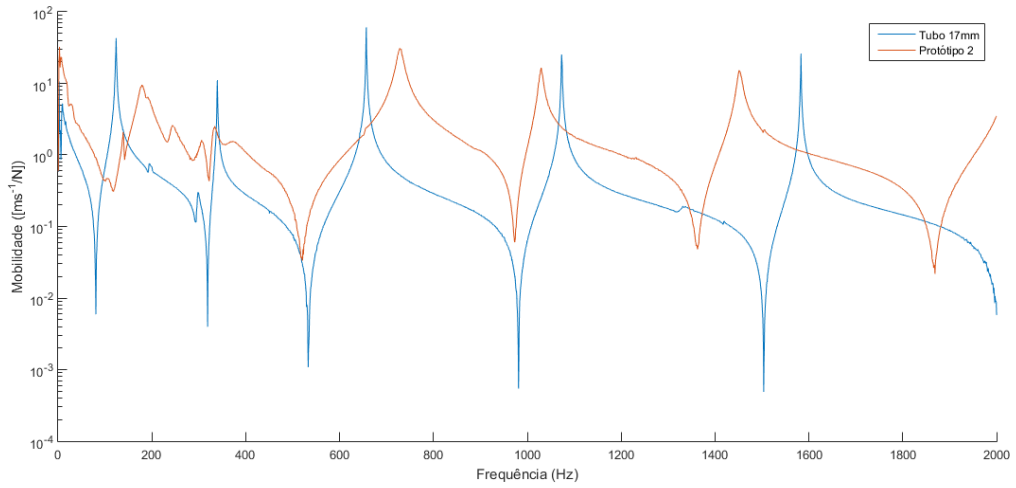


Figura A.23: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF do Tubo com o Protótipo 2

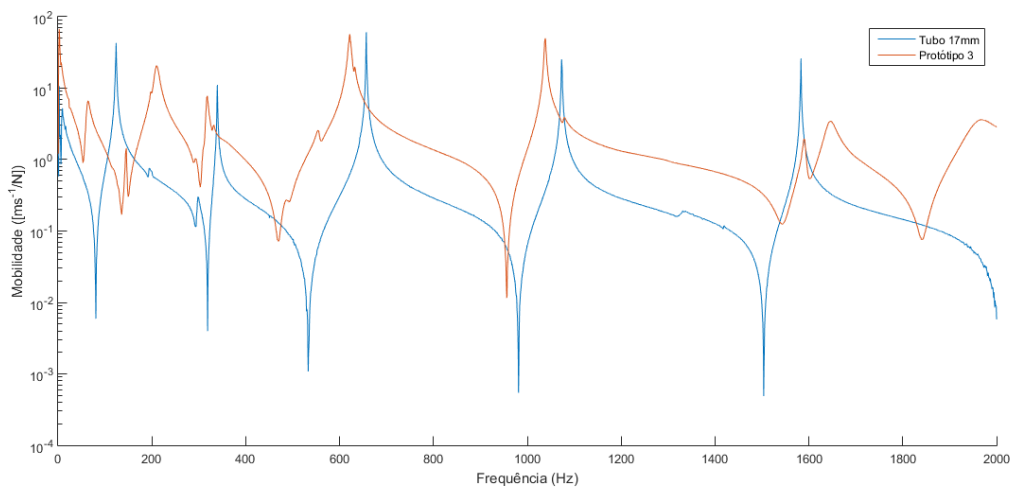


Figura A.24: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF do Tubo com o Protótipo 3

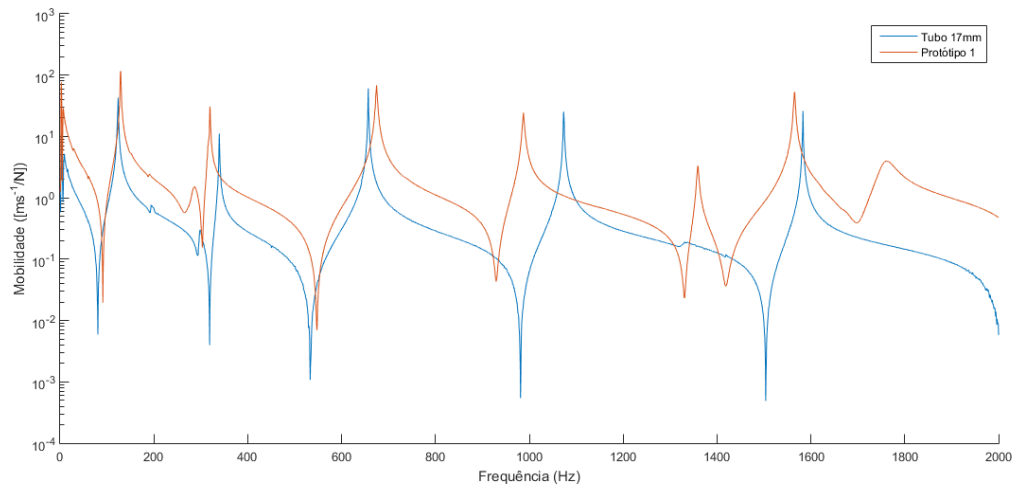


Figura A.25: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF do Tubo com o Protótipo 1 Medida na ortogonal

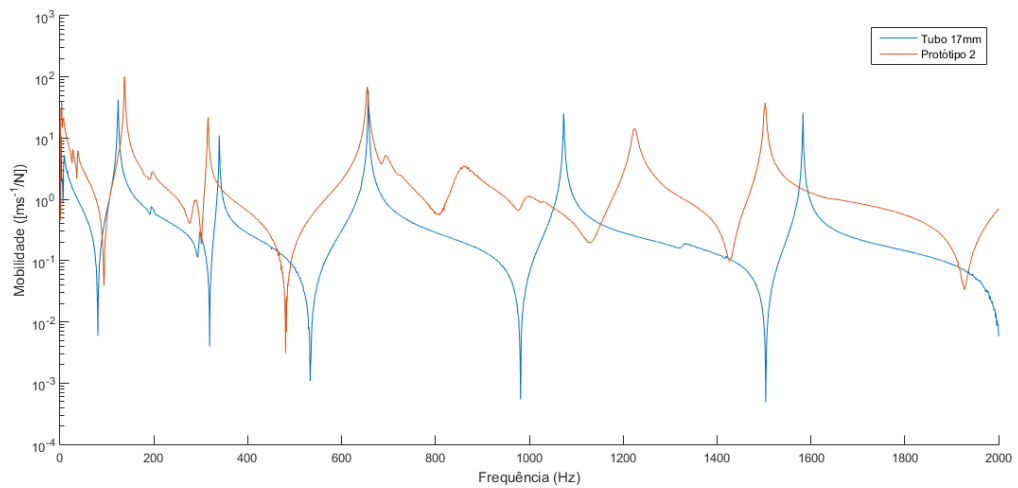


Figura A.26: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF do Tubo com o Protótipo 2 Medida na ortogonal

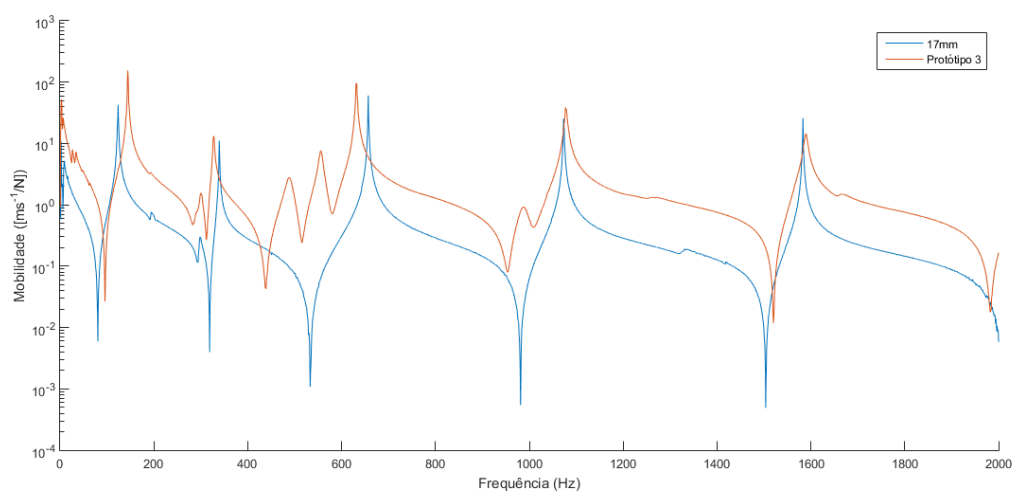


Figura A.27: Função FRF direta tubo 17mm e Função FRF do Tubo com o Protótipo 3 Medida na ortogonal

Anexo B

Modos Naturais

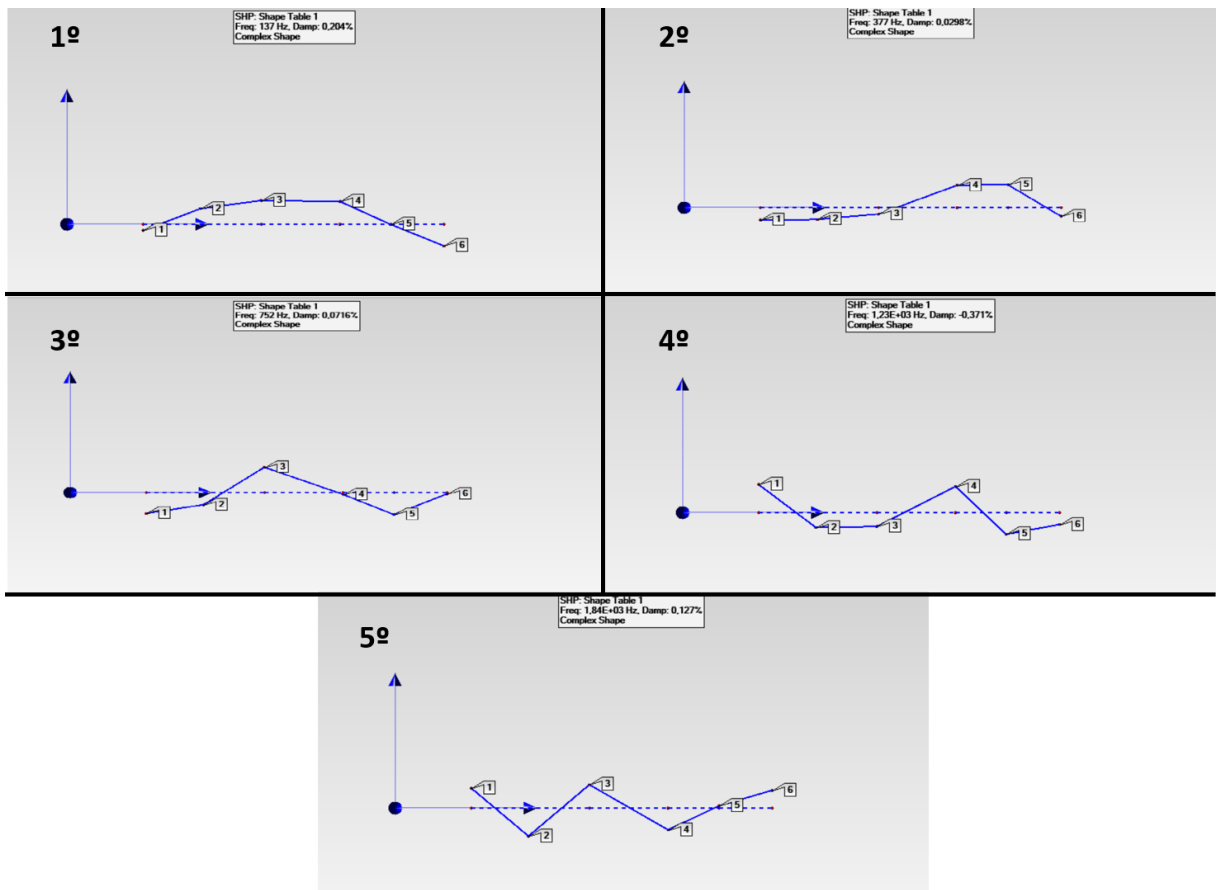


Figura B.1: Modos de Flexão para as vigas

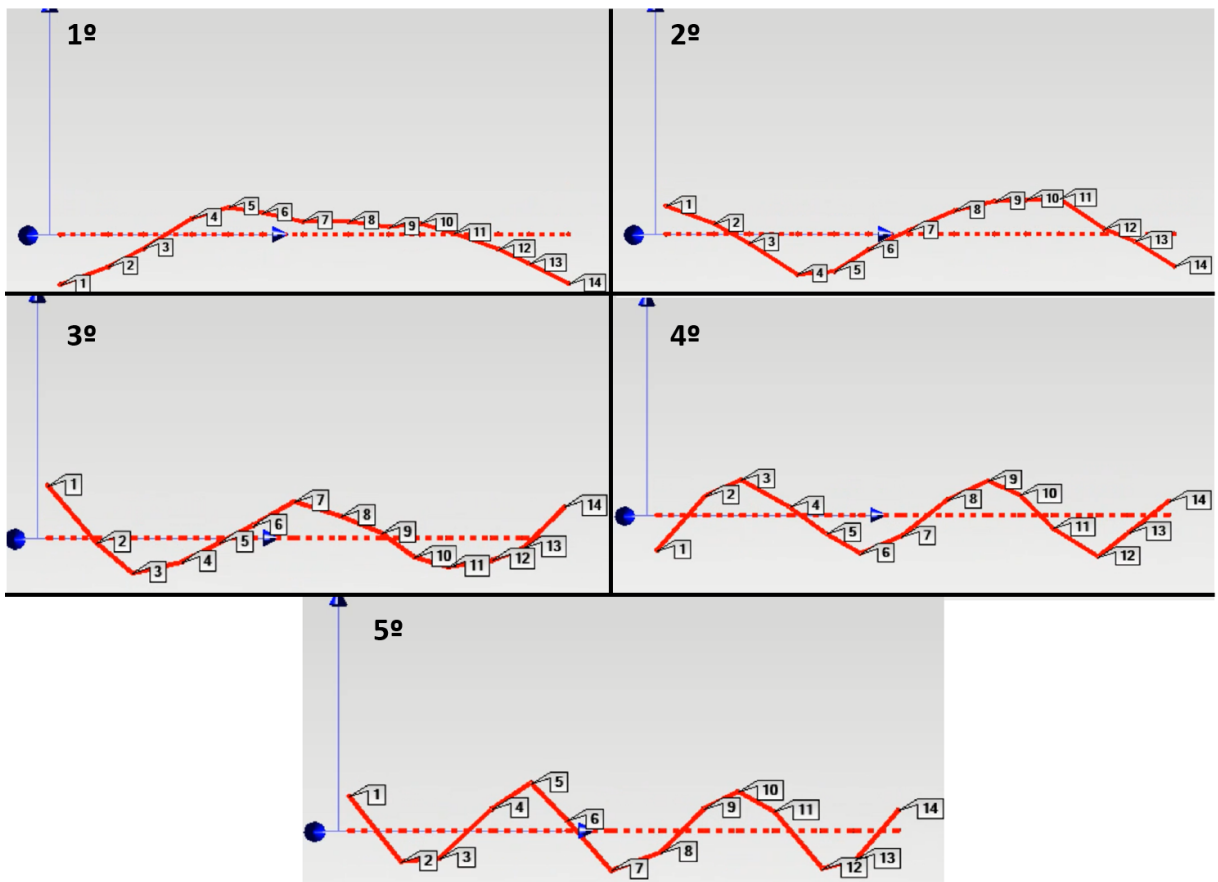
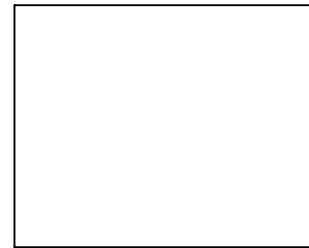
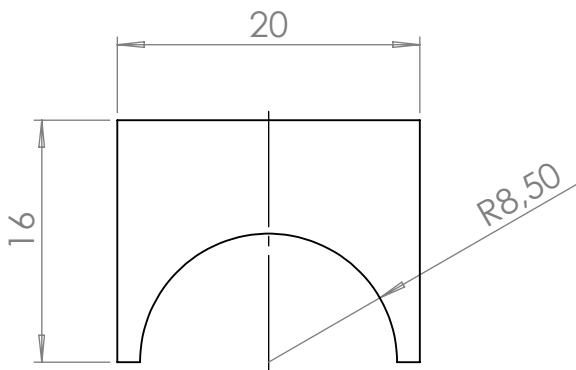


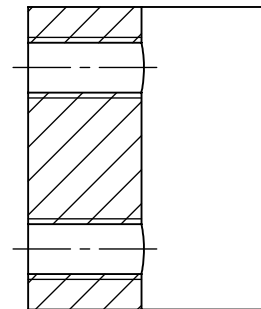
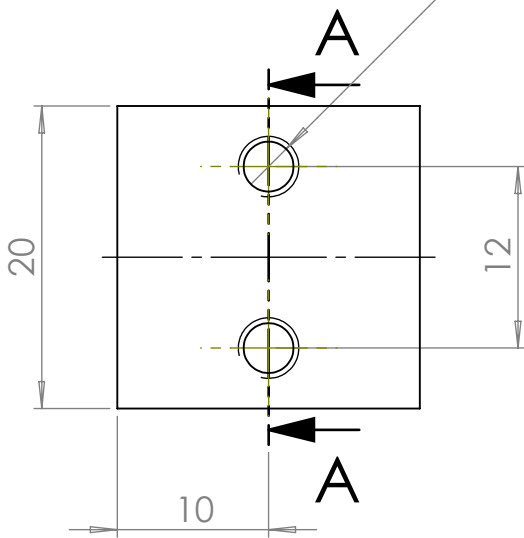
Figura B.2: Modos de Flexão para as tubagens

Anexo C

Desenhos Técnicos



2 x \varnothing 3,30 THRU ALL
M4 - 6H THRU ALL



SECTION A-A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

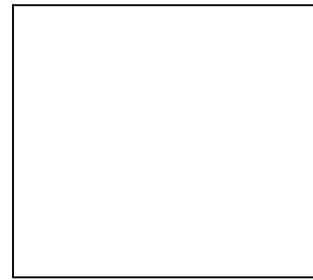
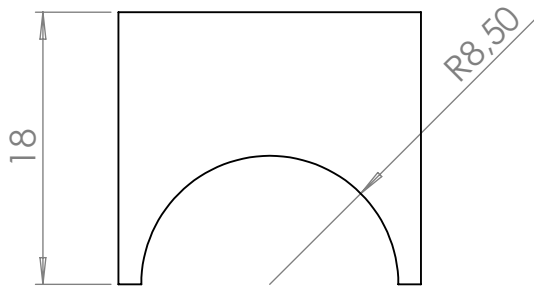
DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

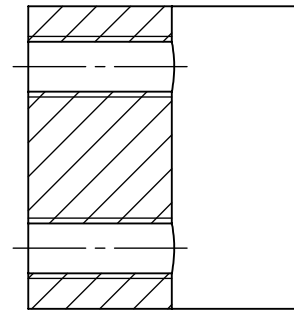
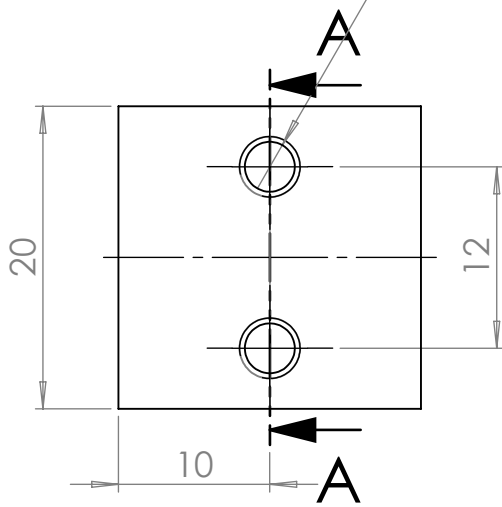
REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE	
DRAWN				
CHK'D				
APPV'D				
MFG				
Q.A				

TITLE:			
MATERIAL:			
DWG NO.	braca		A4
WEIGHT:	SCALE:2:1	SHEET 1 OF 1	



2 x \varnothing 3,30 THRU ALL
M4 - 6H THRU ALL



SECTION A-A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE	
DRAWN				
CHK'D				
APPV'D				
MFG				
Q.A				

TITLE:

MATERIAL:

DWG NO.

braca2

A4

WEIGHT:

SCALE:2:1

SHEET 1 OF 1

Anexo D

Orçamentos

braca.SLDPRT Delete
20.0 x 16.0 x 20.0 mm
[Manufacturable with Aluminum 6061-T6](#)

Qty: 1000 [Show bulk pricing](#) **€3,890.00**

Material	Type of Aluminum
Aluminum	Aluminum 6061-T6
Mild steel	Aluminum 7075-T6
Tool steel	Aluminum 6082
Titanium	Aluminum 5083
Copper	
Polycarbonate	
POM (Delrin)	
PTFE (Teflon)	
PEEK	
Custom material	

Selected material Close ^
Aluminum 6061-T6
Alternative names: AlMg1SiCu, 3.3214
[Show material description](#)

Surface finish - 9 options
As machined (Ra 3.2µm, 126µin)

Description **Subtotal €3,890.00**

Figura D.1: Orçamento para Abraçadeira 1

braca2.SLDPRT Delete
20.0 x 18.0 x 20.0 mm
[Manufacturable with Aluminum 6061-T6](#)

Qty: 1000 [Show bulk pricing](#) **€3,930.00**

Material	Type of Aluminum
Aluminum	Aluminum 6061-T6
Mild steel	Aluminum 7075-T6
Tool steel	Aluminum 6082
Titanium	Aluminum 5083
Copper	
Polycarbonate	
POM (Delrin)	
PTFE (Teflon)	
PEEK	
Custom material	

Selected material Close ^
Aluminum 6061-T6
Alternative names: AlMg1SiCu, 3.3214
[Show material description](#)

Surface finish - 9 options
As machined (Ra 3.2µm, 126µin)

Description **Subtotal €3,930.00**

Figura D.2: Orçamento para Abraçadeira 2

Anexo E

Tabelas

Tabela E.1: Variação de Amortecimento e Frequência

Modos Naturais		1º *	2º *	3º *	4º *	5º *
3M 434	Variação de Amortecimento (%)	1,04	2,22	2,65	2,73	-
	Variação Frequência (Hz)	11,1	34	19	14	-
	Variação Frequência (%)	11,58	13,08	3,55	1,65	-
3M Espesso	Variação de Amortecimento (%)	9,03	14,17	11,44	15,58	-
	Variação Frequência (Hz)	48,1	77	37	70	-
	Variação Frequência (%)	50,16	29,62	6,92	8,23	-
EPS 300	Variação de Amortecimento (%)	0,41	-0,02	0,36	0,10	-
	Variação Frequência (Hz)	-15,1	-34	-77	-119	-
	Variação Frequência (%)	-15,75	-13,08	-14,39	-13,99	-
Cortiça e Alumínio	Variação de Amortecimento (%)	0,99	2,14	2,64	1,86	1,84
	Variação Frequência (Hz)	6	54	5	-10	-30
	Variação Frequência (%)	4,38	16,02	0,66	-0,81	-1,63

* Modos Naturais de flexão no plano da face da viga

Tabela E.2: Variação de Amortecimento e Frequência

Forma Modal (Flexão)		1 ^a *	2 ^a *	3 ^a *	4 ^a *	5 ^a *
Config. 1-3M	Δ Amort. (%)	0,33	0,48	0,45	0,52	0,57
	Variação Freq. (Hz)	1	-2	-8	-13	12
	Variação Freq. (%)	-0,81	-0,59	-1,22	-1,21	0,78
Config. 2-3M	Δ de Amort. (%)	0,48	0,34	0,11	0,30	0,35
	Variação Freq. (Hz)	1	-3	-4	-3	32
	Variação Freq. (%)	0,81	-0,88	-0,61	-0,28	2,08
Config. 3-3M	Δ de Amort. (%)	0,04	0,21	0,29	0,37	0,32
	Variação Freq. (Hz)	-3	-4	-9	-13	32
	Variação Freq. (%)	-2,44	-1,18	-1,37	-1,21	2,08
Config. 4-3M	Δ de Amort. (%)	0,42	0,46	0,44	0,24	0,30
	Variação Freq. (Hz)	0	-1	-3	-13	22
	Variação Freq. (%)	0	-0,30	-0,46	-1,21	1,43
Config.1-3M dobro espessura	Δ de Amort. (%)	0,72	0,66	0,78	0,78	0,88
	Variação Freq. (Hz)	-1	-4	-18	-33	-18
	Variação Freq. (%)	-0,81	-1,18	-2,74	-3,08	-1,17
Config. 1 Cortiça e alumínio	Δ de Amort (%)	0,20	0,25	0,21	0,28	0,31
	Variação Freq. (Hz)	0	-1	-3	-13	32
	Variação Freq. (%)	0	-0,30	-0,46	-1,20	-2,08
Espiral 3M	Δ de Amort. (%)	0,14	0,67	0,15	0,33	0,36
	Variação Freq. (Hz)	-13	-1	-71	-116	-128
	Variação Freq. (%)	-10,57	-0,30	-10,82	10,81	-8,3225
Espiral Cortiça e Alumínio	Δ de Amort. (%)	0,22	0,26	0,13	0,18	0,14
	Variação Freq. (Hz)	-4	-8	-9	-33	-8
	Variação Freq. (%)	-3,25	-2,36	-1,37	-3,08	-0,52

ordem no plano OXZ

Tabela E.3: Variação de Amortecimento e Frequência

Forma Modal (Flexão)		1 ^a *	2 ^a *	3 ^a *	4 ^a *	5 ^a *
SR2	Varição de Amortecimento (%)	0,24	0,75	0,05	0,06	0,07
	Varição Frequência (Hz)	-12	-43	-70	-115	-128
	Varição Frequência (%)	-9,76	-12,72	-10,67	-10,72	-8,32
SE28	Varição de Amortecimento (%)	0,15	0,13	0,20	0,04	0,03
	Varição Frequência (Hz)	-8	-21	-42	-77	-68
	Varição Frequência (%)	-6,50	-6,21	-6,40	-7,18	-4,42
EPS300	Varição de Amortecimento (%)	0,14	0,10	0,03	0,04	0,04
	Varição Frequência (Hz)	-6	-19	-39	-73	-58
	Varição Frequência (%)	-4,87	-5,62	-5,95	-6,80	-3,77
HA67	Varição de Amortecimento (%)	0,17	0,26	0,10	0,13	0,14
	Varição Frequência (Hz)	-18	-45	-85	-139	-168
	Varição Frequência (%)	-14,63	-13,31	-12,96	-12,95	-10,92
TAN32	Varição de Amortecimento (%)	0,07	0,11	0,08	0,06	0,07
	Varição Frequência (Hz)	-8	-22	-46	-79	-78
	Varição Frequência (%)	-6,45	-6,57	-7,05	-7,38	-4,97

* ordem no plano OXZ

Tabela E.4: Variação de Amortecimento

Forma Modal (Flexão)		1 ^a *	2 ^a *	3 ^a *	4 ^a *	5 ^a *
Protótipo 1	Varição de Amortecimento (%)	4,23	0,23	2,29	0,74	1,16
	Varição Frequência (Hz)	17	-26	108	-63	122
	Varição Frequência (%)	13,82	-7,69	16,46	-5,87	7,93
Protótipo 2	Varição de Amortecimento (%)	3,85	1,47	0,88	0,42	0,41
	Varição Frequência (Hz)	56	-8	73	-43	-88
	Varição Frequência (%)	45,53	-2,37	11,12	-4,000	-5,72
Protótipo 3	Varição de Amortecimento (%)	0,99	0,13	0,42	0,16	0,70
	Varição Frequência (Hz)	87	-21	-34	-33	102
	Varição Frequência (%)	70,73	-6,21	-5,18	-3,08	6,63

* ordem de flexão no plano OXZ

Tabela E.5: Variação de Amortecimento Ortogonal

Forma Modal (Flexão)		1 ^a *	2 ^a *	3 ^a *	4 ^a *	5 ^a *
Protótipo 1	Varição de Amortecimento (%)	0,40	0,13	0,18	0,20	0,09
	Varição Frequência (Hz)	6	-19	18	-86	-38
	Varição Frequência (%)	4,88	-5,62	2,74	-8,01	-2,47
Protótipo 2	Varição de Amortecimento (%)	0,39	0,21	0,22	0,42	0,09
	Varição Frequência (Hz)	14	-23	-1	147	-38
	Varição Frequência (%)	11,38	-6,80	-0,15	13,70	-2,47
Protótipo 3	Varição de Amortecimento (%)	0,393	0,208	0,142	0,217	0,255
	Varição Frequência (Hz)	22	-11	-24	7	52
	Varição Frequência (%)	17,88	-3,25	-3,65	0,65	3,38

* ordem de flexão no plano OXY

Anexo F

MSE com Recurso ao Femap

F.1 Passos no Femap

Para extrair os ficheiros desejados do programa são necessários alguns passos que se encontram enumerados.

- 1º- Aceder ao menu *File* e dentro desse menu encontra-se o submenu *Export*, neste seleciona-se a opção *Analysis Model*;
- 2º Na janela *Export to* seleciona-se a opção *Comma-Separated*;
- 3º Na janela *Export Method* é necessário selecionar escolher a análise desejada;
- 4º No comando *Entity Selection* tem que se aceder a opção *Method* e seleciona-se opção *Material*;
- 5º Selecionar um elemento do viscoelástico para criar o 1º ficheiro referente aos materiais viscoelásticos;
- 6º Repetir os 3 primeiros passos e no comando *Entity Selection* selecionar a opção que diz *Select All* para criar o 2º ficheiro referente aos materiais todos;

F.2 Código Matlab

```
fid=fopen('vem.csv'); %%read first file
n=1;
m=1;

g=0;
tline=fgetl(fid);

while(ischar(tline))

if(strcmp(tline,'Mode '))
g=g+1;
m=1;
```

```

n=1;

else

[token , remain]=strtok ( tline , ' ');
j=str2num ( token );
if ( j== -1)
%fim
else
Mat ( n , m , g ) = str2num ( token );
[token , remain]=strtok ( remain , ' , ' );
m=m+1;
Mat ( n , m , g ) = str2num ( token );
n=n+1;
m=1;
end

end

tline=fgetl ( fid );

end

M1=sum ( Mat (: , 2 , 1 ) ); %%read second file
fid=fopen ( ' tudo . csv ' );
n=1;
m=1;

g=0;
tline=fgetl ( fid );

while ( ischar ( tline ) )

if ( strcmp ( tline , ' Mode ' ))
g=g+1;
m=1;
n=1;

else

[token , remain]=strtok ( tline , ' , ' );
j=str2num ( token );
if ( j== -1)
%fim
else
Mat ( n , m , g ) = str2num ( token );

```



```
[ token , remain]=strtok ( remain , ' , ' );  
m=m+1;  
Mat ( n , m , g )=str2num ( token );  
n=n+1;  
m=1;  
end  
  
end  
  
tline=fgetl ( fid );  
  
end  
  
M11=sum ( Mat ( : , 2 , 1 ) );  
  
T1=M1/M11; %Fator de perda
```