



João Pedro de Castro Torres

**Avaliação do envelhecimento de perfis estruturais de PRFV
utilizando ensaios dinâmicos não destrutivos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo programa de Pós-
graduação em Engenharia Civil do Departamento de
Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio

Orientador: Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso, D.Sc

Coorientador: Cássio Marques R. Gaspar, D.SC

Rio de Janeiro

Abril de 2022



João Pedro de Castro Torres

**Avaliação do envelhecimento de perfis estruturais
de PRFV utilizando ensaios dinâmicos não
destrutivos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo programa de Pós-
graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada
pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Cássio Marques R. Gaspar

Coorientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof^a. Janine Domingos Vieira

UFF

Prof . Wendell Diniz Varela

UFRJ

Rio de Janeiro, 28 de abril de 2022.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

João Pedro de Castro Torres

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal Fluminense, UFF, em 2019. Atualmente projetista estrutural. Principais áreas de interesse: Estruturas de concreto armado e materiais compósitos.

Ficha Catalográfica

Torres, João Pedro de Castro

Avaliação do envelhecimento de perfis estruturais de PRFV utilizando ensaios dinâmicos não destrutivos / João Pedro de Castro Torres ; orientador: Daniel Carlos Taissum Cardoso ; coorientador: Cássio Marques R. Gaspar. – 2022.

92 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2022.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Análise modal experimental. 3. PRFV. 4. Degradação. 5. Técnicas não destrutivas. I. Cardoso, Daniel Carlos Taissum. II. Gaspar, Cássio Marques R. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD:624

Agradecimentos

À minha esposa Talita Moraes P. de C. Torres por todo companheirismo e carinho desde nossa adolescência. Com sua ajuda, tudo fica mais simples.

Aos meus pais, João Carlos Catrolli Torres e Desirée Bruver de Castro, e ao meu irmão Daniel por todo sacrifício que fizeram e amor que me deram para que eu me tornasse a pessoa que sou hoje.

Aos meus orientadores Daniel Cardoso e Cássio Gaspar pelos conhecimentos compartilhados e principalmente pela compreensão e incentivo em momentos difíceis como os vividos na pandemia.

Aos colegas de pesquisa e de curso Bruno Jordão, Geovane Almeida, Priscilla Vieira, Jessé Beserra, Lucas Ferreira, Vitor Mattos e José Guilherme por toda ajuda prestada.

Ao escritório Adler projetos estruturais que através do Engº Cláudio Adler e Engº Rodrigo Louzada me incentivaram durante o curso.

Às professoras Eliane Carvalho e Janine Vieira que, além de me introduzir no meio acadêmico, me incentivaram para que entrasse no mestrado.

À PUC-Rio pela estrutura e oportunidade em aprender com excelentes profissionais.

À Petrobras pelo suporte financeiro e a oportunidade de participar de uma de suas pesquisas.

À CAPES pelo suporte financeiro.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Torres, João Pedro de Castro; Cardoso, Daniel Carlos Taissum (Orientador); Gaspar, Cássio Marques R. (Coorientador). **Avaliação do envelhecimento de perfis estruturais de PRFV utilizando ensaios dinâmicos não destrutivos**. Rio de Janeiro, 2022. 92p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nas últimas décadas, perfis pultrudados de polímeros reforçados com fibra (PRF) vêm despertando grande interesse na indústria civil devido a sua alta relação entre resistência e peso e sua aplicabilidade em ambientes agressivos. Apesar de apresentar grande resistência às intempéries, a degradação dos PRF foi notada após anos de exposição em campo. A utilização de ensaios não destrutivos (END) se mostra como uma boa alternativa para avaliar a integridade deste material, havendo especial interesse para controle de qualidade de baixo custo em campo. Dessa forma, este trabalho utilizou ensaios de vibração livre com duas técnicas de excitação por impulso para detectar danos em polímeros reforçados com fibra de vidro envelhecidos em câmaras com elevada temperatura, umidade e salinidade. Através da avaliação das frequências naturais e amortecimentos, foi observado o impacto das condições ambientais na integridade do material, resultado corroborado pela variação das propriedades elásticas obtidas através da resposta dinâmica acústica.

Palavras-chave

Análise modal experimental, PRFV, degradação, técnicas não destrutivas

Abstract

Torres, João Pedro de Castro; Cardoso, Daniel Carlos Taissum (Advisor); Gaspar, Cássio Marques R. (Coadvisor). **Aging assessment of structural GFRP profiles through non-destructive dynamic testing.** Rio de Janeiro, 2022. 92p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the last decades, pultruded profiles of fiber-reinforced polymers (FRP) have been attracting great interest in the civil industry due to their high strength-to-weight ratio and their applicability in aggressive environments. Despite showing great resistance to weathering, the degradation of FRP was noticed after years of exposure in the field. The use of non-destructive techniques (NDT) has been shown to be a good alternative to evaluate the integrity of this material, with special interest for low-cost quality control in the field. Thus, this work used free vibration tests with two impulse excitation techniques to detect damage in glass fiber reinforced polymers aged in chambers with high temperature, humidity and salinity. Through the evaluation of natural frequencies and damping, the impact of environmental conditions on the integrity of the material was observed, a result corroborated by the variation of elastic properties obtained through the acoustic dynamic response.

Keywords

Modal Analysis, GFRP, aging, non-destructive technique

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Motivação	15
1.2. Objetivo	16
1.3. Estrutura da dissertação	16
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1. Perfil pultrudado e suas características.....	17
2.2. Efeitos do envelhecimento em perfis pultrudados	19
2.2.1. Efeitos causados pela água e alta umidade	20
2.2.2. Soluções alcalinas e ácidas.....	23
2.2.3. Raios UV	23
2.2.4. Temperatura Elevada	23
2.2.5. Estudos da degradação a longo prazo em perfis pultrudados	24
2.3. Caracterização e avaliação de danos em perfis pultrudados através de ensaios dinâmicos	31
2.3.1. Fundamentação da análise modal experimental	31
2.3.2. Estudos aplicados à análise modal de materiais compósitos	39
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	44
3.1. Material utilizado	44
3.2. Ensaio de caracterização por impulso através da resposta sonora	45
3.2.1. Preparo do corpo de prova	47
3.2.2. Procedimento experimental	48
3.3. Ensaio de caracterização por impulso através da resposta em frequência.....	50
3.3.1. Preparo do corpo de prova	50

3.3.2.	Análise preliminar através do modelo numérico	51
3.3.3.	Procedimento experimental	54
4.	RESULTADOS	59
4.1.	Aspectos físicos das amostras	59
4.2.	Resultados da absorção de umidade	61
4.3.	Resultados obtidos no ensaio de caracterização por impulso através da resposta sonora	62
4.4.	Resultados do modelo numérico	64
4.5.	Resultados obtidos na análise modal experimental	66
5.	CONCLUSÃO	84
5.1.	Sugestões para trabalhos futuros	86
	REFERÊNCIAS	87

Lista de Figuras

Figura 1. Etapas do processo de pultrusão [9]	18
Figura 2. Mecanismos de absorção de água e suas consequências (Adaptado de Davies et al.[16])	22
Figura 3. Morfologia da corrosão do PRFC para diferentes condições de envelhecimento: a) intacto; b) 50°C-solução de 3,5% NaCl por 3 meses; c) 50°C-solução de 3,5% NaCl por 7 meses; 30°C-solução de 0,0% NaCl por 7 meses; e) 30°C-solução de 5,0% NaCl por 7 meses; f) 70°C-solução de 3,5% NaCl por 7 meses (Adaptado de Li et al. [15])	22
Figura 4. Absorção de água para diferentes condições ambientais (Adaptado de Liao et al. [7])	25
Figura 5. Módulo de flexão para diferentes condições ambientais (Adaptado de Liao et al. [7]).....	26
Figura 6. Resistência à flexão para diferentes condições ambientais (Adaptado de Liao et al. [7])	26
Figura 7. a) Absorção de água para diferentes temperaturas; b) coeficiente de difusão ao longo do aumento de temperatura (Adaptado de Grammatikos et al. [8])	28
Figura 8. Resultados dos ensaios de tração para os CPs envelhecidos (Adaptado de Grammatikos et al. [8]).....	29
Figura 9. Resultados dos ensaios de cisalhamento para os CPs envelhecidos (Adaptado de Grammatikos et al. [8]).....	29
Figura 10. Absorção de água para a) alma interna; b) alma externa e c) mesa (Adaptado de Jiang et al. [24]).....	31
Figura 11. Esquema de sistema massa-mola-amortecedor	32
Figura 12. Modos de vibração da estrutura	33
Figura 13. Setup para uma análise modal experimental [35]	36
Figura 14. a) Sinal de entrada do martelo piezoelétrico; b) sinal de saída das acelerações (Adaptado de Shin et al. [36]).....	36
Figura 15. a) FRF sem pré-processamento; b) FRF com pré-processamento; c) FRF da média de 10 sinais; c) FRF com média de 3 sinais com pré-processamento (Adaptado de Shin et al. [36])	38
Figura 16. CMIF para um determinado sinal (Adaptado de Allemang et al. [37])	39

Figura 17. Formas modais intactas e danificadas (Adaptado Russo et al. [28])	42
Figura 18. Perfil cantoneira de abas iguais utilizados nos ensaios. a) Perfil inteiro; b) Seção transversal (dimensões em mm).	44
Figura 19. Setup utilizado no SONELASTIC para a) ensaio de flexão e b) ensaio de cisalhamento.....	46
Figura 20. Região do perfil de onde os CPs foram cortados (dimensões em mm).	47
Figura 21. Corpos de prova utilizados nos ensaios do SONELASTIC	48
Figura 22. a) Câmaras utilizadas para o envelhecimento; b) visão interna das câmaras.....	49
Figura 23. Perfil utilizado no ensaio de vibração com resposta em frequência sendo colocado na câmara de envelhecimento. (perfil íntegro)	51
Figura 24. Modelo numérico discretizado da cantoneira	52
Figura 25. Configuração livre-livre de ensaio; a) apoio na laje de reação; b) fixação dos elásticos no perfil; c) nivelamento do perfil; d) visão geral do ensaio.....	54
Figura 26. Impactos para a realização do ensaio de vibração livre	56
Figura 27. Fixação do acelerômetro	56
Figura 28. Setup utilizado para os ensaios	57
Figura 29. Diagrama típico de estabilização das funções de resposta em frequência para o ensaio preliminar	58
Figura 30. Visão dos perfis após o envelhecimento de a) 33 dias; b) 66 dias e c) 136 dias. Sendo o perfil intacto o da extrema esquerda, o perfil da câmara de 35°C no centro e o da câmara de 70°C na direita	59
Figura 31. Presença de oxidação elevada e cristalização de sal na superfície do perfil degradado à 70°C e aos 136 dias.....	60
Figura 32. Comparação da tonalidade dos perfis da câmara de a) 35°C e b) 70°C aos 136 dias	60
Figura 33. Absorção de água ao longo do envelhecimento para os 4 CPs	62
Figura 34. Variação do módulo de elasticidade à flexão ao longo do envelhecimento	63

Figura 35. Variação do módulo de cisalhamento ao longo do envelhecimento	64
Figura 36. Modos de vibração numéricos	66
Figura 37. Utilização de dois elásticos na extremidade do perfil	67
Figura 38. Diagrama de estabilização das funções de resposta em frequência para o a) ensaio com um elástico em cada extremidade e b) dois elásticos em cada extremidade	68
Figura 39. Comparação entre modos e frequências numéricas com experimentais para os perfis 1-35°C e 2-70°C intactos.....	75
Figura 40. Função de resposta em frequência para o perfil 1-35°C intacto e envelhecido	76
Figura 41. Normalização das frequências de vibração para o perfil 1-35°C	76
Figura 42. Função de resposta em frequência para o perfil 2-70°C intacto e envelhecido	78
Figura 43. Normalização das frequências de vibração para o perfil 2-70°C	79
Figura 44. Normalização da variação do amortecimento para os 15 primeiros modos do perfil 1-35°C	80
Figura 45. Normalização da variação do amortecimento para os 15 primeiros modos do perfil 2-70°C	81

Lista de Tabelas

Tabela 1. Propriedades para diferentes tipo de PRF (Adaptado de Vedernikov et al. [10])	19
Tabela 2. Modos de vibração e suas frequências (Adaptado Kessler et al. [33])	40
Tabela 3. Propriedades do perfil utilizado. Fonte: Adaptado Togashi et. al [42]	45
Tabela 4. Propriedades utilizadas no modelo numérico	53
Tabela 5. Módulo de elasticidade à flexão dos CPs submetidos à caracterização por resposta Sonora e seus respectivos desvios padrões	62
Tabela 6. Módulo de cisalhamento dos CPs submetidos à caracterização por resposta Sonora e seus respectivos desvios padrões	63
Tabela 7. Comparação entre modos de vibração e suas frequências para diferentes rigidezes do apoio.....	69
Tabela 8. Variação das frequências e suas diferenças percentuais em relação ao perfil intacto para envelhecimento de 33,66 e 136 dias para o perfil 1-35°C	77
Tabela 9. Variação das frequências e suas diferenças percentuais em relação ao perfil intacto para envelhecimento de 33,66 e 136 dias para o perfil 2-70°C	79
Tabela 10. Taxa de amortecimento e suas diferenças percentuais em relação ao perfil íntegro para o perfil 1-35°C intacto e envelhecido	82
Tabela 11. Taxa de amortecimento e suas diferenças percentuais em relação ao perfil íntegro para o perfil 2-70°C intacto e envelhecido	83

Lista de Símbolos

k	Rigidez modal
c	Constante de amortecimento
m	Massa modal
$F(t)$	Força
x	Deslocamento
ω	Frequência modal
$\phi(x)$	Autovetor
$Y(x, t)$	Deslocamento modal
$y(t)$	Amplitude máxima do autovetor
$\bar{m}$	Massa por unidade de comprimento
L	Comprimento da viga
I	Momento de inércia
E	Módulo de elasticidade
t	tempo
$A(f)$	Sinal de resposta no domínio da frequência
$F(f)$	Sinal de resposta da excitação no domínio da frequência
$H(f)$	Função de resposta em frequência
$H_1(f)$	Média de várias funções de resposta em frequência
$CMIF_k(f)$	Função CMIF (<i>Complex Mode Indicator Function</i>)
$\Lambda_k(f)$	k^o autovetor da matriz normal da matriz FRF
$\Sigma_k(f)$	k^o valor singular da matriz FRF
$V_{f,rov}$	Volume de fibras
$E_{L,t}$	Módulo longitudinal de tração (experimental)
$F_{L,t}$	Resistência à tração longitudinal (experimental)
$E_{L,c}$	Módulo longitudinal de compressão (experimental)
$F_{L,c}$	Resistência à compressão (experimental)
$E_{L,f}$	Módulo longitudinal de flexão (experimental)
$E_{T,f}$	Módulo de flexão transversal (experimental)
G_{LT}	Módulo de cisalhamento no plano
m_u	Massa úmida
m_s	Massa seca

ρ	Massa específica
E_1	Módulo de elasticidade na direção da fibra
E_2	Módulo de elasticidade transversal as fibras
G_{12}	Módulo de cisalhamento no plano
ν_{12}	Coeficiente de Poisson no plano
ν_{23}	Coeficiente de Poisson fora do plano
E_L	Módulo longitudinal de tração
E_T	Módulo transversal
G_{23}	Módulo de cisalhamento fora do plano
ν_{LT}	Maior coeficiente de Poisson
ν_{LT}	Menor coeficiente de Poisson
MAPE	Mean Absolute percentagem error
N	Número de vezes
f_i^{num}	Frequência numérica
f_i^{exp}	Frequência experimental

1. INTRODUÇÃO

A utilização de perfis pultrudados de polímeros reforçados com fibra (PRF) vem se difundindo cada vez mais devido às suas vantagens como baixo peso específico, alta resistência, durabilidade, resistência à corrosão, facilidade de transporte e montagem e características não magnéticas [1,2]. Essas propriedades o levam a serem utilizados em pontes e outros tipos de obras de arte especiais, torres de resfriamento, edificações, meio automobilístico, torres de transmissão elétrica e principalmente no meio off-shore [3]. Apesar dos pontos positivos, a utilização destes compósitos ainda é limitada, seja pelo alto custo, falta de normas de projeto específicas e mão de obra especializada [1].

Mesmo sendo referência no que se diz durabilidade, ainda há uma preocupação no comportamento do material no longo prazo sob condições ambientais agressivas como exposição aos meios ácidos e alcalinos, água, salinidade, fogo e elevada temperatura e raios ultravioletas, sendo estes assuntos amplamente estudados atualmente [4]. Diversos ensaios e metodologias são aplicadas para avaliar os danos causados ao material, incluindo ensaios destrutivos como tração, compressão, flexão e cisalhamento e não destrutivos como ultrassom, tomografia computadorizada, shearografia etc. Apesar de diversas técnicas serem empregadas nestes estudos, pouco se encontra na literatura sobre avaliação dos danos através de análises modais experimentais.

1.1. Motivação

A utilização da análise modal experimental é uma ferramenta já difundida no ambiente de monitoração da saúde da estrutura (*structural health monitoring*, SHM, em inglês) e avaliação de danos em materiais. Apesar disso, poucos estudos dos danos causados pelo ambiente em materiais compósitos, especialmente em perfis pultrudados, podem ser encontrados na literatura. Dessa forma, é interessante avaliar a capacidade dessa técnica em caracterizar a degradação do material submetido a condições de elevada temperatura, umidade e salinidade.

1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é a avaliação da degradação de perfis pultrudados de FRP envelhecidos em câmaras de névoa salina com elevadas temperaturas por meio de ensaios de vibração livre. Para isso, foram utilizadas as técnicas de excitação por impulso, uma através de um martelo piezoelétrico e um acelerômetro, obtendo as frequências naturais, modos de vibração e taxas de amortecimento destes perfis; e outra, utilizando um pulsador eletromagnético automático e um microfone, estimando o módulo de elasticidade à flexão e o módulo de cisalhamento de corpos de provas extraídos ao longo de perfis FRP.

1.3. Estrutura da dissertação

No Capítulo 1 são apresentados o tema que será abordado na dissertação, motivação e objetivo.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura abordando as características dos perfis pultrudados, efeitos e mecanismos da degradação e análise modal experimental, seus fundamentos e aplicações recentes.

No Capítulo 3 é feita a descrição do programa experimental a ser realizado, bem como do modelo numérico utilizado. São abordados os materiais utilizados, corpos de prova e a definição dos ensaios.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados experimentais e numéricos obtidos a partir dos ensaios descritos no Capítulo 3.

No Capítulo 5 são feitas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Perfil pultrudado e suas características

Nas últimas décadas, perfis pultrudados de polímeros reforçados com fibra (PRF) vêm despertando grande interesse na indústria civil e no meio acadêmico devido a sua alta relação entre resistência e peso e sua aplicabilidade em ambientes agressivos [5–7]. A possibilidade de projetar o material a partir da combinação de uma matriz polimérica como poliéster, epóxi, vinil éster e fibras como aramida, basalto, carbono e vidro possibilita desenvolver propriedades alinhando alta performance e custo, podendo fabricá-lo especialmente para cada necessidade [1,5,8].

Perfis de PRF podem ser confeccionados através de métodos como “wet layup”, “spay lay-up”, “autoclave”, “vacuum-assisted resin transfer molding” (VARTM), “compression molding” e a pultrusão, sendo este último amplamente utilizado nas indústrias da construção e de óleo e gás. Essas diferentes técnicas permitem desenvolver elementos com propriedades variadas, uma vez que possibilitam criar configurações e orientações diferentes para as fibras, assim como diferentes volumes de fibra e de matriz [5,9].

No processo de pultrusão (Figura 1) no qual consiste no método de fabricação dos perfis estudados neste trabalho, fibras geralmente de vidro, carbono ou aramida são puxadas em direção a um tanque de resina onde ocorre sua impregnação. Após essa etapa, o equipamento continua conduzindo as fibras, anexando um “tecido” ou manta responsável por melhorar as propriedades transversais e o véu para proteger a superfície de raios UV e umidade. Após esses procedimentos, o conjunto passa por uma forma, onde tem seu formato definido e onde ocorre a cura devido à alta temperatura [3,9,10]. Características como a possibilidade de mecanizar e padronizar a fabricação, criar diversas seções transversais, assim como confeccionar os perfis com qualquer comprimento destacam esse processo de fabricação em relação aos demais.

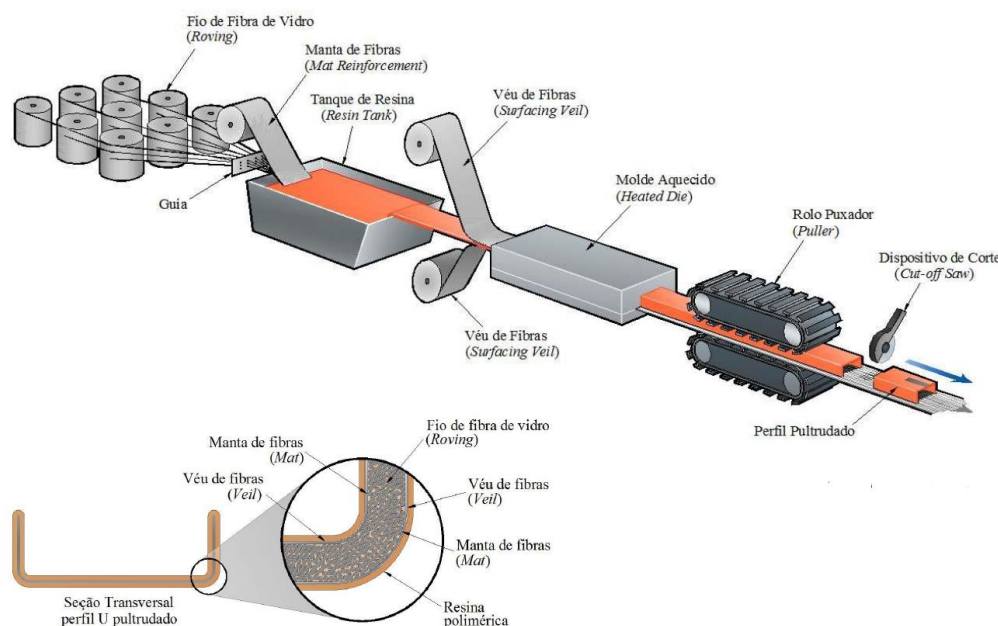


Figura 1. Etapas do processo de pultrusão [9]

Em relação às propriedades mecânicas, existe uma grande variabilidade dependendo dos elementos usados para matriz e reforço, seu volume de fibra e sua orientação como visto na Tabela 1. Os perfis pultrudados costumam possuir uma grande resistência à tração devido principalmente ao comportamento da fibra, mas uma pequena inclinação da carga em relação ao alinhamento do reforço causa uma significativa redução deste parâmetro. Já na compressão, é visto uma resistência menor, além de ser evidenciado de forma comum a instabilidade como a flambagem local ou global. Assim como sob esforço de tração, a resistência a compressão na direção secundária das fibras apresenta menor valor. As propriedades de flexão são em geral dominadas pelas fibras enquanto as de cisalhamento pela matriz mas a interface desses elementos e sua aderência também são extremamente relevantes para as resistências e para os módulos elásticos [1,5,11].

Tabela 1. Propriedades para diferentes tipo de PRF (Adaptado de Vedernikov et al. [10])

Material	ρ (kg/m ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo à tração (GPa)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência ao cisalhamento (MPa)	Módulo de cisalhamento (GPa)
E-glass roving / poliéster	1600- 2000	307-1320	21-59	290-1240	27	3,5
E-glass mat + roving / poliéster	1750- 1900	235-400	18-36	220-485	25-52	2,6-5,0
E-glass roving/ Vinil éster	1770	240	18-42	240	22	4,0
E-glass mat + roving / Vinil éster	-	-	24	-	-	3,7
E-glass roving/ Epóxi	-	414-790	32-40	-	-	3,0-4,5
E-glass mat + roving/ Epóxi	2000	-	42	-	-	7,0
E-glass roving / Poliuretano		310-850	37-47	-	-	-
Carbono roving/ Epóxi	1500- 1600	1430-2200	130-180	985-1450	72	3,6-4,2
Carbono roving/ vinil éster	1600	2000	140-145	1400	-	-
Kevlar roving/ Estireno- Acrilonitrila	1180	170	9,4	120	-	-
Kevlar roving/ Poliuretano	1235	165	9,2	40	-	-

2.2. Efeitos do envelhecimento em perfis pultrudados

Atualmente, a maior aplicação de perfis pultrudados é realizada em ambientes agressivos, onde a utilização de materiais convencionais levaria a grande necessidade de manutenção [6,7]. Apesar de apresentar grande resistência às intempéries, a degradação dos polímeros reforçados com fibra pode ser notada após anos de exposição em campo [5–7,12].

Entre os fatores do meio que afetam o comportamento, podem ser destacados os ambientes submersos, a presença de salinidade, o contato com soluções alcalinas e ácidas, as temperaturas altas e baixas, a incidência de raios UV, a ocorrência de ciclos de congelamento, descongelamento e de secagem, a combinação entre eles, dentre outros.

Na ocorrência de alta temperatura com umidade, tem-se o chamado envelhecimento higrotérmico, que já foi objeto de diversos trabalhos [5,12,13].

2.2.1. Efeitos causados pela água e alta umidade

Os efeitos causados pela presença de água são um dos mais importantes a serem estudados, uma vez que esse elemento está presente em abundância na natureza [5,12,13]. A água penetra nos PRF pelo processo de difusão através dos volumes livres da matriz polimérica ou por capilaridade ao longo da interface entre fibra e matriz, provocando inchamento do material, que pode levar a tensões internas e consequentemente à formação de danos. As fibras inorgânicas como as de carbono e vidro, por sua vez, apresentam comportamento impermeável, mas a presença de umidade pode gerar danos físicos ou químicos como fissuras em sua superfície e há troca de íons entre o material e a água, reduzindo suas propriedades mecânicas [5,7].

Além disso, processos de degradação físico e químico como a plastificação e hidrólise da matriz acontecem. A plastificação reduz a temperatura de transição vítrea (T_g) e a rigidez das resinas, mas seus danos podem ser parcialmente reversíveis quando o material passa por um processo de secagem nos estágios iniciais de envelhecimento, assim como acontece com a dilatação volumétrica do material [5,7,8,13]. Já a hidrólise, consiste em um processo permanente e irreversível onde ocorre a quebra e o enfraquecimento das moléculas do polímero, reduzindo sua resistência [8]. Apesar de ser um problema observado em várias resinas, o poliéster apresenta maior sensibilidade a esses danos [5].

A degradação da interface entre fibra e matriz também propicia o transporte da água por capilaridade, principalmente em perfis com baixa qualidade de fabricação, ocasionando dilatações e a propagação de fissuras. Outro fenômeno que ocorre é o descolamento entre a fibra e a matriz, ocasionada pela quebra das moléculas na interface entre os dois materiais, reduzindo principalmente a resistência interlaminar ao cisalhamento [7,12,13]. Foi notado também que, por se tratar de uma região

vulnerável, o processo de degradação do material compósito pode ser iniciado nessa camada [7].

Quando é adicionado salinidade à água, seja através de solução ou “salt spray”, é observado que o processo de absorção de água é semelhante à água destilada, sendo que a presença de sal reduz o equilíbrio de saturação. Como as partículas de sal não são absorvidas facilmente como as moléculas de água, um acúmulo de cristais é formado na superfície do material, gerando uma concentração de solução fora do material maior que dentro do mesmo. Essa diferença gera uma pressão osmótica contra a absorção de água, reduzindo o nível de saturação [14]. Li et al. [15] constatou que a presença de diferentes concentrações de NaCl (3,5% e 5%) não são suficientes para observar uma grande variação na absorção, mostrando que a concentração de sal não é tão importante para a difusão, para a redução das propriedades elásticas e para a resistência.

A água então possui a capacidade de aumentar as fissuras inerentes do material e do seu processo de fabricação assim como criar novas fissuras e vazios, propiciando maior absorção e o progresso dos mecanismos de degradação. Foi evidenciado também que as propriedades do material dominadas pela fibra, como as de tração paralela às fibras, apresentam uma mudança bem sutil no seu comportamento enquanto as propriedades regidas pela matriz e a interface, como as de tração perpendicular às fibras e de cisalhamento, reduzem significativamente [5,12,13]. Um resumo do funcionamento da absorção de água e seus danos pode ser visto na Figura 2. Já a Figura 3 ilustra, através de imagens obtidas por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura (“Scanning electron microscope”), os danos para um polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) intacto e envelhecido em temperaturas de 30°C e 70°C, salinidades de 0%, 3,5% e 5% para 3 e 7 meses. Através desse ensaio foi observado corrosão da matriz (Figura 3 - 3b e 3d), micro fissuras na matriz e delaminações (Figura 3 - 3c e 3e) e partículas de NaCl (Figura 3 e) e f) [15].

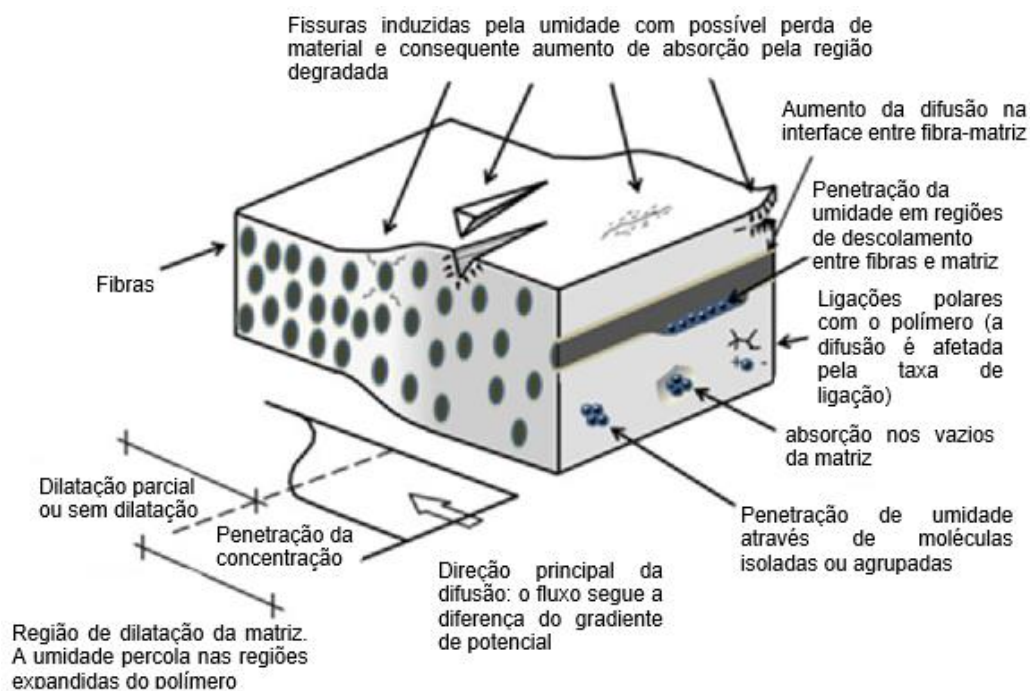


Figura 2. Mecanismos de absorção de água e suas consequências (Adaptado de Davies et al[16])

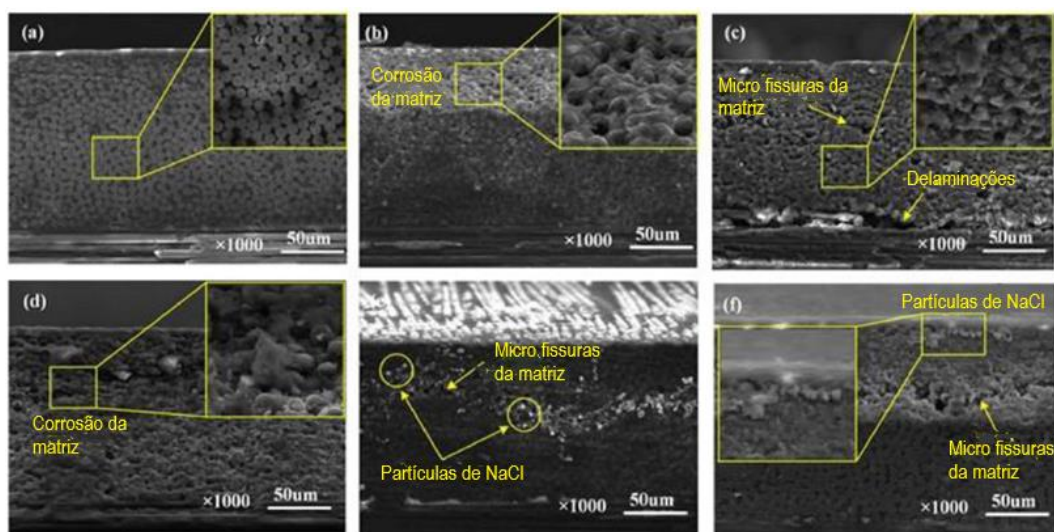


Figura 3. Morfologia da corrosão do PRFC para diferentes condições de envelhecimento: a) intacto; b) 50°C-solução de 3,5% NaCl por 3 meses; c) 50°C-solução de 3,5% NaCl por 7 meses; 30°C-solução de 0,0% NaCl por 7 meses; e) 30°C-solução de 5,0% NaCl por 7 meses; f) 70°C-solução de 3,5% NaCl por 7 meses (Adaptado de Li et al. [15])

2.2.2. Soluções alcalinas e ácidas

Estas soluções atuam de forma semelhante à presença de água em contato com o material: infiltram por difusão/capilaridade e geram dilatações diferenciais com consequente fissura e perda de rigidez, além de degradação química. A imersão em soluções alcalinas aparenta maior impacto na degradação do material, enquanto as soluções ácidas apresentam resultados contraditórios, sendo observado o aumento das propriedades de tração e sua redução em diferentes experimentos, assim como as propriedades de flexão [5,17]. As fibras de vidro por sua vez, apresentam significativa redução de resistência na presença de soluções alcalinas onde quanto maior o pH do meio, maior a degradação de suas propriedades[18]

2.2.3. Raios UV

Apesar de representar apenas 5% da luz solar, os raios UV também são responsáveis em causar danos nos materiais orgânicos através de reações fotoquímicas. Eles, em conjunto com o oxigênio, causam a quebra de ligações químicas e iniciam processos de oxidação levando à degradação. Apesar de ser um fenômeno que atua na superfície do material (cerca de 10 μ m de profundidade), ele pode acabar fazendo com que as fibras fiquem expostas, levando a problemas mais severos ao longo do tempo [19,20].

2.2.4. Temperatura Elevada

A alta temperatura tem a capacidade de afetar principalmente a matriz polimérica e ocorre quando se ultrapassa a T_g (temperatura de transição vítrea) do material, usualmente variando entre 50 e 90°C [5]. Quando isso acontece, o aspecto vítreo das resinas é substituído por um comportamento mais maleável ou “emborrachado”, dificultando a transferência de esforços entre resina e fibra [5,21]. Neste estágio, o comportamento da falha é dominado pela fibra, apresentando característica frágil. Além disso, a elevada temperatura tem a capacidade de acelerar os efeitos de degradação ocasionados pela água (condição higrotérmica), uma vez que aumentam a velocidade do processo de difusão,

principalmente pelo aumento do volume livre na matriz polimérica [13]. Esta situação representa um dos principais casos de ações ambientais, sendo usualmente estudado na simulação do envelhecimento.

2.2.5. Estudos da degradação a longo prazo em perfis pultrudados

Liao et al. [7] utilizaram perfis pultrudados de fibra de vidro do tipo E-glass e resina vinil éster para estudar os efeitos da degradação ambiental por longo período de tempo. As amostras, que possuíam volume de fibra de cerca de 34%, foram submetidas a ensaios de flexão e de tração na direção principal (0°), i.e. paralela às fibras, nas seguintes condições:

- Água destilada por 3900h (162 dias) a 25°C
- Solução salina (NaCl) de 5% por 3980h (166 dias) a 25°C
- Solução salina (NaCl) de 10% por 6570h (274 dias) a 25°C
- Água destilada por 2400h (100 dias) a 75°C

Além desses espécimes, foram confeccionados corpos de prova (CP) para análise da flexão na direção secundária (90°). As condições estudadas foram:

- Água destilada por 7940h (331 dias) a 25°C
- Água destilada por 1360h (57 dias) a 75°C

Em relação à absorção de água, como pode ser visto na Figura 4, tanto a temperatura quanto a salinidade afetam a difusão nos PRFs. Inicialmente, é possível ver um comportamento Fickiano, que segue a Lei de Fick [22,23], e é caracterizado por um rápido ganho de massa seguido pela redução do gradiente da curva ao chegar na saturação. Também é possível observar que a salinidade reduz a absorção da água, sendo a taxa de crescimento da curva do espécime sujeito a imersão em água destilada maior que do espécime em solução de 5% de NaCl que por sua vez é maior que a de 10% de NaCl. Por fim, é notado também que os CPs submetidos a elevadas temperaturas apresentaram uma absorção mais rápida do que aqueles expostos a temperaturas mais amenas.

Após o pico de saturação, o gráfico apresenta uma redução de massa nos elementos armazenados em 75°C , usualmente associado à

hidrólise, separação das cadeias poliméricas e dissociação da matéria localizada na interface entre fibra e matriz.

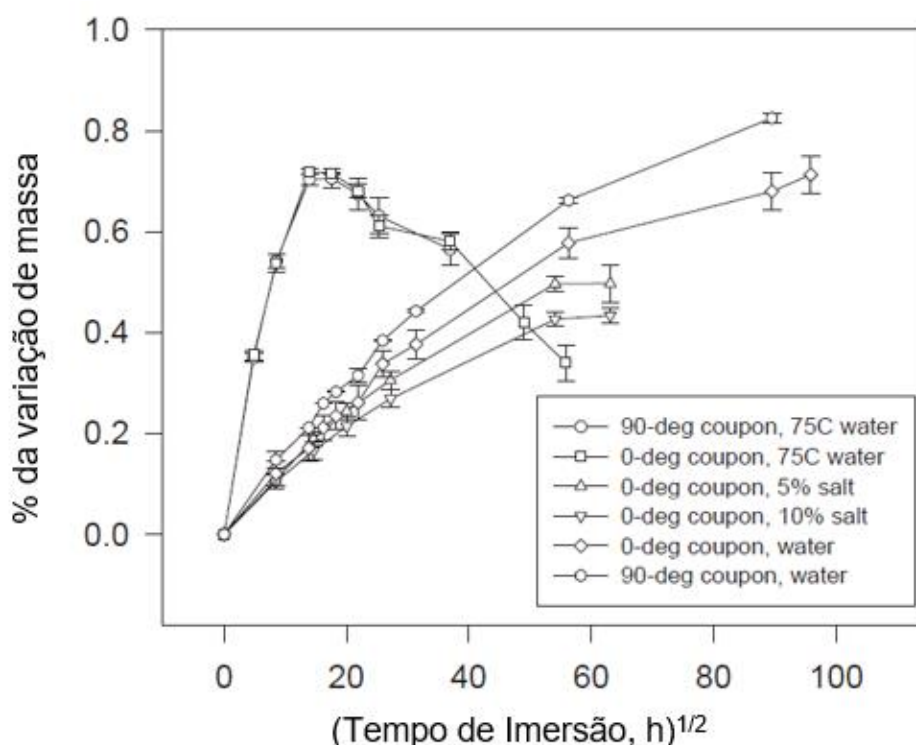


Figura 4. Absorção de água para diferentes condições ambientais (Adaptado de Liao et al. [7])

Analisando a redução das propriedades como o módulo e a resistência à flexão, percebeu-se que as condições ambientais mais severas afetaram mais significativamente a resistência do que a rigidez do material (Figura 5 e Figura 6).

Em relação ao módulo de flexão, a presença de NaCl não apresentou grande influência, sendo praticamente imperceptível no curto período de tempo. Apesar da redução mais acentuada na condição com solução de 10% de NaCl, este caso apresenta um tempo de exposição maior em relação à água destilada e com 5% de NaCl. Além disso, a alta temperatura não apresentou uma queda tão significativa, sendo em torno de 10%.

Já na resistência à flexão, reduções significantes foram observadas. O sal, ao contrário do caso anterior, apresentou uma redução de 12% e 13% respectivamente nos casos de 5% e 10% de concentração. Quando

submetido a temperaturas mais elevadas, a propriedade estudada reduziu cerca de 40%.

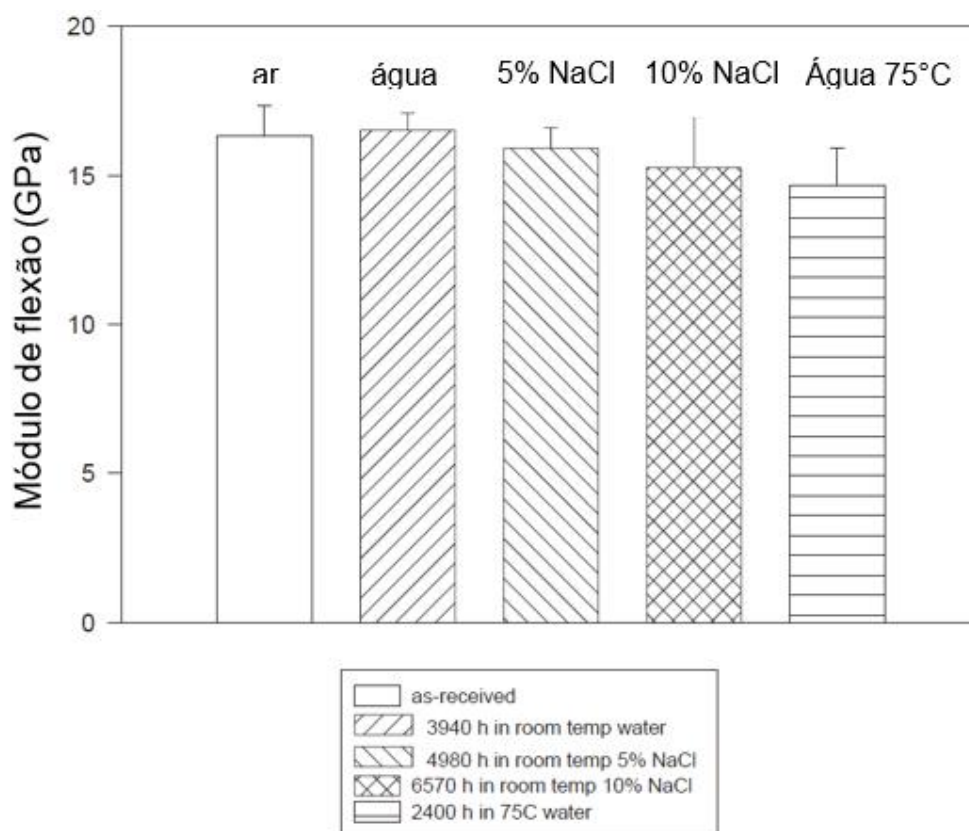


Figura 5. Módulo de flexão para diferentes condições ambientais (Adaptado de Liao et al. [7])

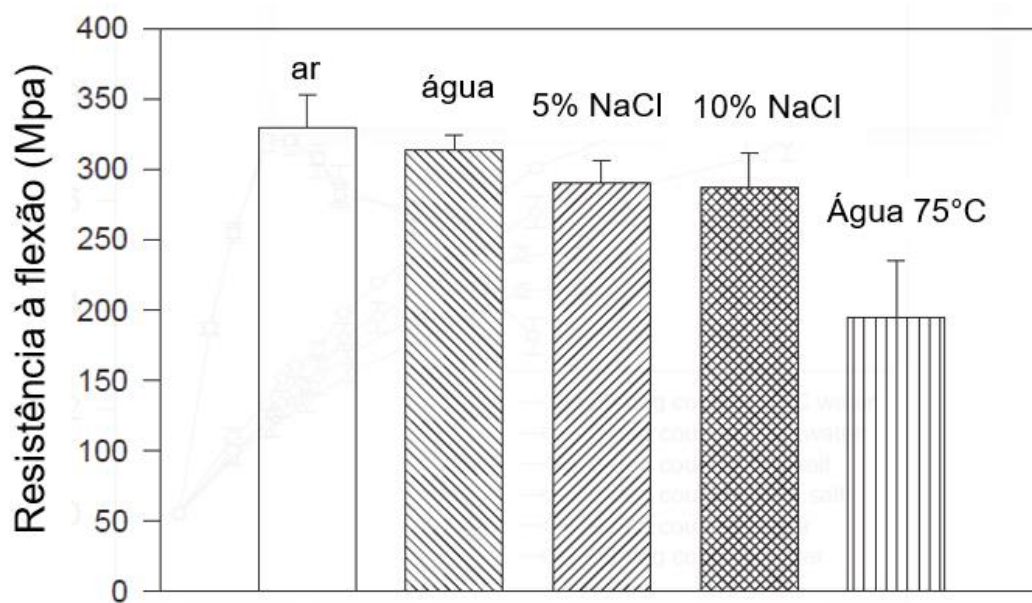


Figura 6. Resistência à flexão para diferentes condições ambientais (Adaptado de Liao et al. [7])

Os autores também perceberam que o modo de falha do material se alterou ao longo do envelhecimento. Para os CPs imersos em temperatura ambiente e aos 75°C, houve uma redução das fissuras transversais, sendo ocasionada pela degradação da interface entre fibra e matriz e sua plastificação.

Grammatikos et al. [8] estudaram os efeitos do envelhecimento higrotérmico em placas pultrudadas de poliéster isoftálico reforçadas com fibras de vidro do tipo E-glass com volume de 45%. Espécimes foram armazenados em temperaturas de 25°C, 40°C, 60°C e 80°C e avaliados ao longo de 28, 56, 112 e 224 dias.

Em relação à absorção de água, os autores desenvolveram o gráfico da Figura 7, onde as linhas cheias representam os resultados obtidos por gravimetria e as tracejadas as previsões através do modelo Fickiano. Os ensaios mostraram que o aumento da temperatura levou a um aumento da absorção de água, tendo os estágios iniciais uma boa correlação com o comportamento segundo as leis de Fick, mas ao longo prazo esta análise perde eficiência e não é a mais apropriada. Foi possível também constatar que não houve equilíbrio de saturação nas temperaturas de 25°C, 40°C e 60°C. Já aos 80°C, é possível notar a redução da massa do corpo de prova, originada pela hidrólise, além de evidenciar que a decomposição química do material é iniciada em períodos relativamente curtos de tempo. Como a absorção é uma função do tempo e não da temperatura, é possível que em intervalos de tempo maiores que o ensaiado, o valor da massa de água absorvida seja próximo do obtido na curva aos 80°C.

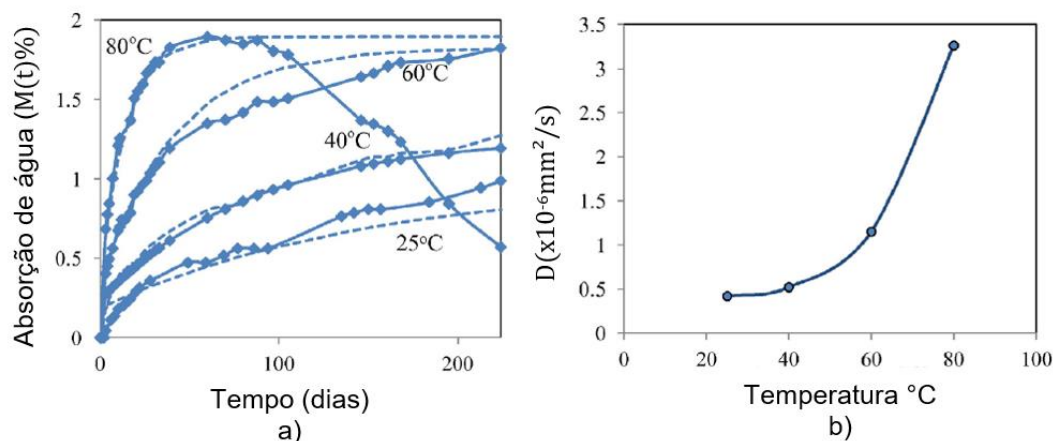


Figura 7. a) Absorção de água para diferentes temperaturas; b) coeficiente de difusão ao longo do aumento de temperatura (Adaptado de Grammatikos et al. [8])

Em relação aos ensaios mecânicos, a Figura 8 e a Figura 9 mostram respectivamente os resultados para os ensaios de tração e de cisalhamento, representando a porcentagem entre as propriedades não envelhecidas e as envelhecidas.

Através dos ensaios de tração, foi observado que nas temperaturas de 25°C, 40°C e 60°C a tensão de ruptura não variou significativamente, chegando a reduzir 17% para a temperatura de 80°C. O aumento de resistência observado nas temperaturas mais baixas pode ser causado pelo fenômeno de pós cura, onde a energia fornecida durante a elevação da temperatura leva à formação de mais ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas, não formadas durante a cura do material. É evidente o efeito concomitante do ganho de resistência em temperaturas mais brandas com a degradação do material em temperaturas mais elevadas. Já na análise do módulo de elasticidade, os resultados aparentam flutuar em relação ao valor do CP não envelhecido, apresentando a maior variação (cerca de 20% de perda) aos 80°C.

No ensaio de cisalhamento, foi percebido uma redução da resistência até os 112 dias, seguido por um ganho expressivo dessa propriedade. Esse efeito pode ser explicado novamente pelo efeito de pós cura, onde a matriz de poliéster possivelmente teve uma cura incompleta na sua produção. A redução da propriedade até os 112 dias pode ser explicada pela plastificação do polímero, podendo as microfissuras terem também papel nesta degradação.

Comparando os dois ensaios, fica claro que as propriedades dominadas pela fibra, como as de tração, são bem menos afetadas que as dominadas pela matriz, como as de cisalhamento.

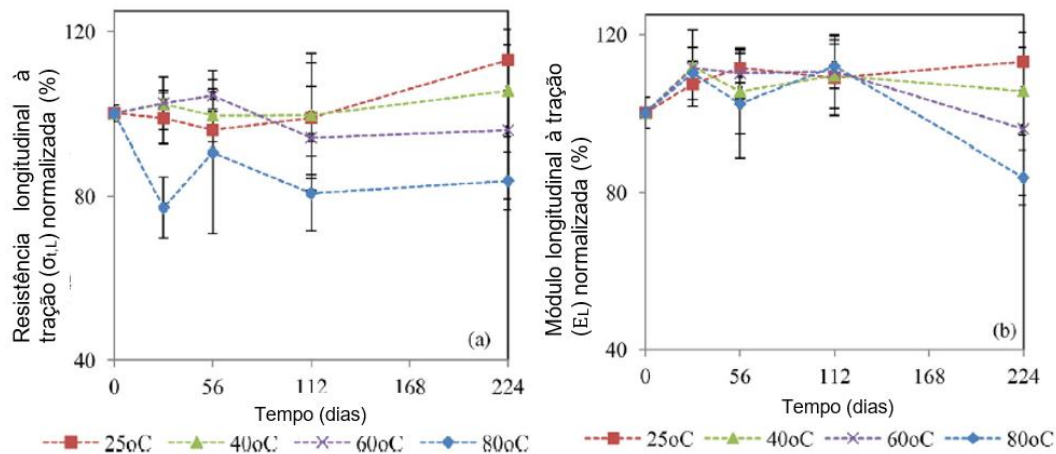


Figura 8. Resultados dos ensaios de tração para os CPs envelhecidos (Adaptado de Grammatikos et al. [8])

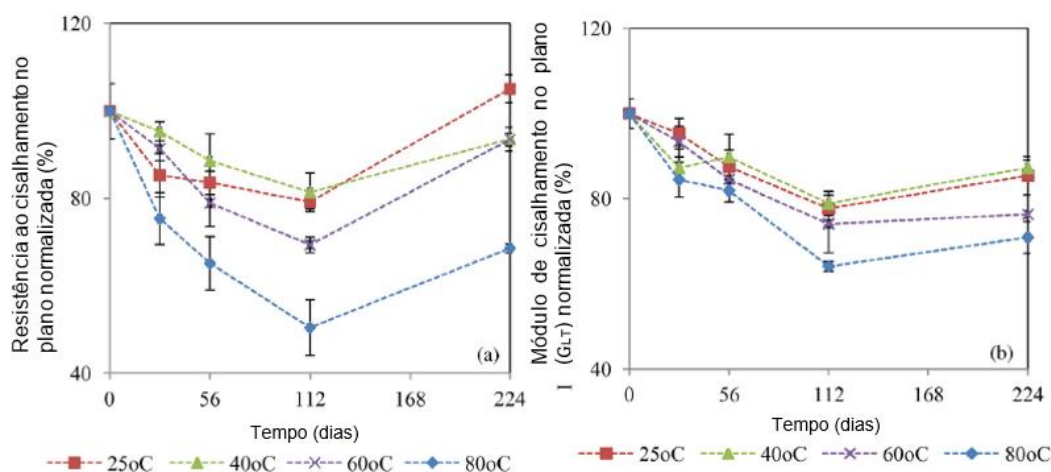


Figura 9. Resultados dos ensaios de cisalhamento para os CPs envelhecidos (Adaptado de Grammatikos et al. [8])

Além dos ensaios destrutivos, os autores utilizaram diversas técnicas para avaliar a degradação: análises por Scanning Electron Microscopy (SEM), através do qual perceberam que a interface entre fibra e matriz se manteve praticamente intacta aos 224 dias de envelhecimento; análises por Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), onde verificaram que não houve dano significativo na superfície das fibras; e análise por espectroscopia de infravermelho (FTIR), observando que houve um dano

químico mínimo na matriz envelhecida. Por fim, a tomografia computadorizada permitiu visualizar e localizar imperfeições internas no material não envelhecido, como fissuras ao longo da direção principal, facilitando o transporte de umidade, e criando “bolsões de água”.

Já Jiand et al. [24] estudaram os efeitos da absorção em um deck pultrudado utilizado na West Mill Bridge, no Reino Unido. Foram preparados espécimes para a alma interna, a alma externa e a mesa, uma vez que a fração de fibra em cada elemento não era homogênea. Apesar disso, a média de volume de fibras do elemento era de 62% de E-glass em uma matriz de poliéster isoftálico.

No total, quatro diferentes condições ambientais foram testadas, duas condições submersas e com temperaturas de 20°C e 40°C e duas com umidades relativas de 50% à 20°C e 96% à 40°C. Ao longo de 250 dias de absorção (Figura 10) foi observado que o patamar de saturação foi alcançado com aproximadamente 2 dias, exibindo um comportamento linear bem evidente, como indica a teoria de difusão Fickiana. Após esse estágio, a absorção de umidade varia de acordo com cada ambiente e de como isso impacta a relaxação da matriz. Essa relaxação é um processo prolongado relacionado ao rearranjo das cadeias do polímero, com redução na tensão de atração entre as moléculas com o tempo e aumento do volume livre.

Comparando os corpos de prova submersos e os submetidos ao vapor, é evidenciado que esta primeira condição gera maiores quantidades de água absorvida, chegando em até 3,5%. Das duas situações com os elementos dentro da água, ambos exibiram comportamento muito semelhante, excluindo o fato que em temperaturas mais altas (40°C) houve uma taxa de absorção um pouco mais elevada. No caso dos espécimes em contato com umidades relativas, houve grande diferença quando variada a porcentagem de água presente. Comparando as diferentes partes do deck de compósito, percebeu-se que a mesa apresentou menor absorção de água, sendo justificado pela maior quantidade de fibra neste elemento. Além disso, em todos os casos é evidente que a elevada temperatura acelera o processo de difusão.

Também é possível observar a redução de massa ao longo do tempo nas curvas com temperatura aos 40°C e principalmente com 96% de umidade, sendo atribuída à hidrólise e a lixiviação das moléculas. Esses danos físicos e químicos são iniciados pelo aumento da temperatura próxima da T_g , onde, segundo Ashcroft [25], a cada 1% de água absorvida, a temperatura de transição vítrea reduz cerca de 20°C.

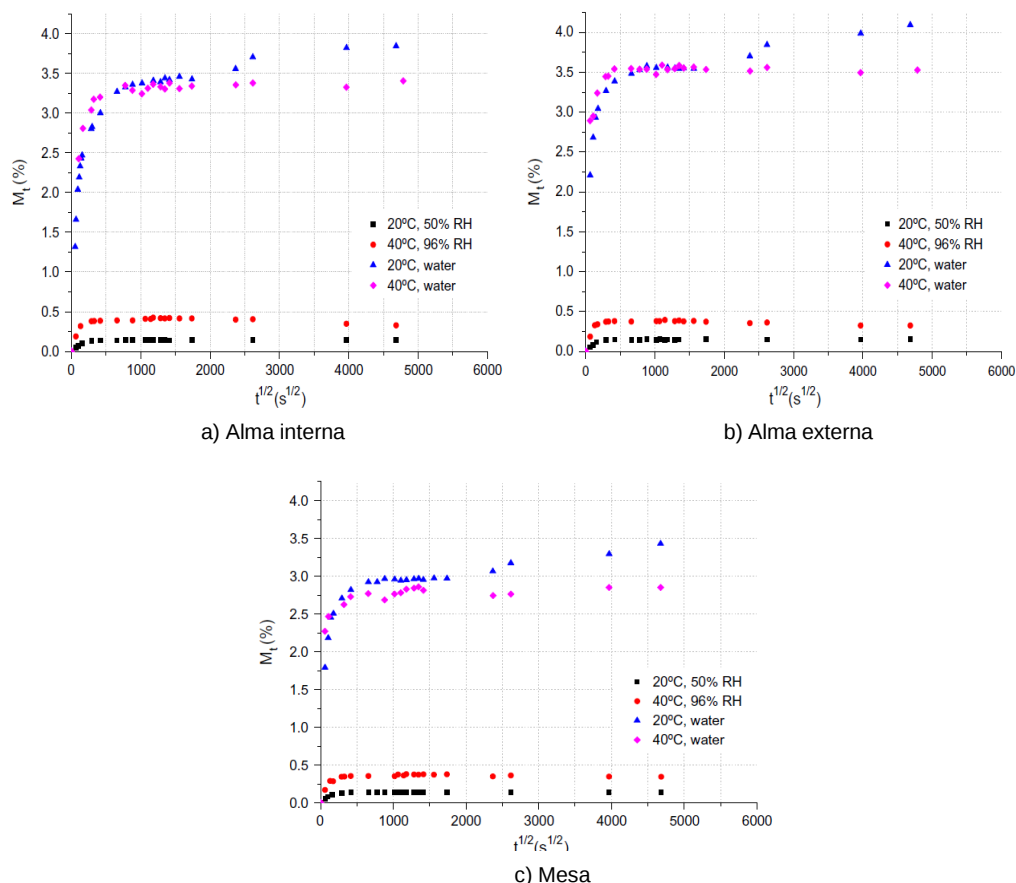


Figura 10. Absorção de água para a) alma interna; b) alma externa e c) mesa (Adaptado de Jiang et al. [24])

2.3. Caracterização e avaliação de danos em perfis pultrudados através de ensaios dinâmicos

2.3.1. Fundamentação da análise modal experimental

Para compreender como as propriedades dinâmicas do sistema estrutural, em termos de frequências naturais e modos de vibração, podem indicar danos e sua relação com as propriedades elásticas do material, é necessário entender como esse fenômeno acontece.

Para obter a equação do movimento, estuda-se um modelo de um sistema massa-mola-amortecedor de um grau de liberdade, ilustrado na Figura 11, sendo K a rigidez modal, C o amortecimento, M a massa modal e $F(t)$ a perturbação dinâmica [26].

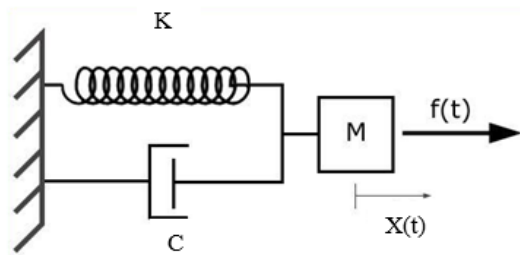


Figura 11. Esquema de sistema massa-mola-amortecedor

Considerando o equilíbrio do corpo exposto na Figura 11, quando $F(t)$ atua como uma força resultante, pela segunda lei de Newton tem-se que:

$$F(t) = \frac{d}{dt} \left(m \frac{dx(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

Onde,

$F(t)$ é a força resultante;

m é a massa;

$x(t)$ é a posição do corpo.

Quando a massa se desloca em $+x$ a força elástica na mola é:

$$F_e(t) = -kx \quad (2)$$

Onde k é a constante elástica da mola.

De forma análoga, a força do amortecimento viscoso é expressa como:

$$F_c(t) = -c\dot{x} \quad (3)$$

Onde c é a constante de amortecimento viscoso.

Aplicando então o equilíbrio do corpo da Figura 11 tem-se que:

$$F(t) = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad (4)$$

A Equação (4) é denominada equação fundamental da dinâmica.

Em uma vibração livre não amortecida, ou seja, ao se aplicar uma força impulsiva em um sistema sem amortecimento ($c = 0$), é possível obter a equação 5 e, conseqüentemente, encontrar sua frequência natural de

vibração (ω) de acordo com a equação 6, considerando a solução da equação diferencial linear, homogênea, de segunda ordem e coeficientes constantes, do tipo $x = A \sin(\omega t + \varphi)$.

$$0 = m\ddot{x} + kx \quad (5)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6)$$

Ao se excitar, contudo, uma estrutura real, infinitos modos de vibração cujo autovetor não seja nulo no ponto estudado serão estimulados, tendo o comportamento de vibração da estrutura a contribuição de todos esses modos.

Graças ao método da superposição modal, todos os modos da estrutura podem ser desacoplados e estudados separadamente, sendo o comportamento oscilatório resultante constituído do somatório dos infinitos modos de vibração excitados, como é visto na Figura 12 e evidenciado pela equação 7.

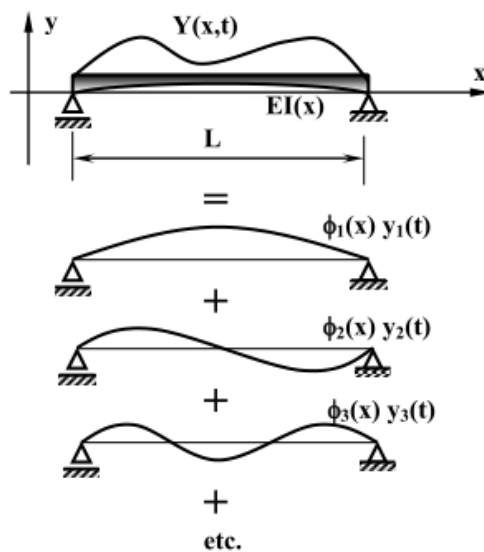


Figura 12. Modos de vibração da estrutura

$$Y(x, t) = \sum_{j=1}^{j=\infty} \phi_j(x) y_j(t) \quad (7)$$

Onde:

$\phi_j(x)$ é a função Autovetor ou vetor modal;

$y_j(t)$ é o deslocamento de um determinado modo ao longo do tempo.

Desta forma, é possível definir massa modal, rigidez modal e força modal para uma viga respectivamente como:

$$M_{modal} = \int_0^L \bar{m} \phi^2(x) dx \quad (8)$$

$$K_{modal} = \int_0^L EI \left(\frac{d^2 \phi(x)}{dx^2} \right) dx \quad (9)$$

$$F_{modal} = \int_0^L F(t) \phi(x) dx \quad (10)$$

Onde:

$\bar{m}$: Massa por unidade de comprimento da estrutura;

$F(t)$: Força variável em função do tempo;

L : Comprimento da estrutura analisada;

E : Módulo de elasticidade do material;

I : Momento de Inércia da seção transversal.

A partir da equação 6, é possível constatar a relação intrínseca entre a rigidez e a frequência natural de vibração, permitindo análises de caracterização das propriedades elásticas através de problemas inversos ou da técnica de *model updating* em conjunto com modelos numéricos [27,28] e o estudo da saúde da estrutura através de técnicas de *health monitoring* [29]. Em geral, a degradação do material ou do elemento estrutural leva a uma variação da frequência de vibração de um ou mais modos da estrutura, sendo necessário que a massa modal, a rigidez modal ou ambos se alterem. Como em alguns casos tanto a massa quanto a rigidez de uma estrutura estão interligadas, descobrir o que de fato está ocorrendo quando é evidenciada alguma alteração nas frequências é uma tarefa complicada. Dessa forma, é necessário a utilização de equipamentos sensíveis às pequenas variações de frequência, sendo indicado, nesses casos, a realização dos ensaios em ambientes controlados como em situações de controle de qualidade na indústria [30]. Constatada alguma alteração, é necessário então verificar localmente os elementos estruturais em busca de reais danos.

A forma mais simples de obter as frequências naturais de vibração de uma estrutura se dá por meio de uma instrumentação com acelerômetros e a realização de ensaios de vibração livre. Para isso, contudo, deve-se realizar um estudo de instrumentação, podendo ser iniciado com um modelo analítico ou numérico a fim de descobrir os

possíveis modos predominantes no comportamento oscilatório e suas frequências aproximadas.

Conhecendo-se então os modos de vibração mais influentes e os estrategicamente mais interessantes, uma vez que a propriedade a ser estudada pode ser regida por modos flexionais ou torcionais, pode-se definir a posição ideal de cada acelerômetro. Após a instrumentação da estrutura, realiza-se o ensaio de vibração livre aplicando uma força impulsiva, um deslocamento inicial ou a ação ambiental no caso de grandes estruturas [27,31].

A análise modal experimental se mostra como uma boa alternativa em relação aos ensaios destrutivos por conseguir preservar as peças estruturais originais e obter seus parâmetros dinâmicos para futura avaliação das constantes elásticas de forma precisa, rápida e barata [27,32,33]. Já difundido no monitoramento da saúde de estruturas com materiais isotrópicos como aço [29], o método baseado nas frequências naturais já evidenciou de forma precisa danos em materiais ortotrópicos ou transversalmente isotrópicos [34].

Na análise modal experimental, a técnica de processamento de sinal de *single-input, single-output* se destaca pelo tratamento e fornecimento de parâmetros do meio através da instrumentação das informações de entrada (sinal de força) e de saída (sinal de aceleração). De forma mais clara, a Figura 13 mostra o setup de uma análise dinâmica experimental, onde uma viga engastada recebe um impacto no ponto A, através de um martelo piezoelétrico, e as acelerações causadas pela ação são medidas no ponto B através de acelerômetros. Os sinais determinísticos obtidos pela excitação e resposta podem então ser definidos no domínio do tempo como $F(t)$ e $a(t)$ respectivamente, conforme Figura 14.

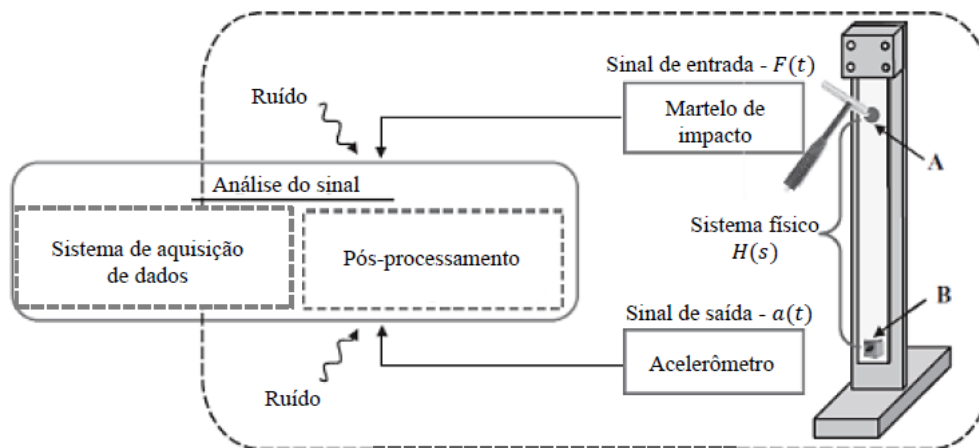
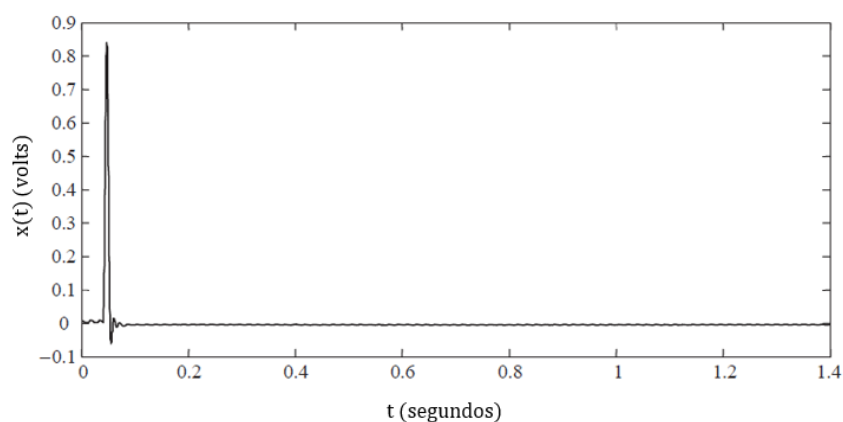
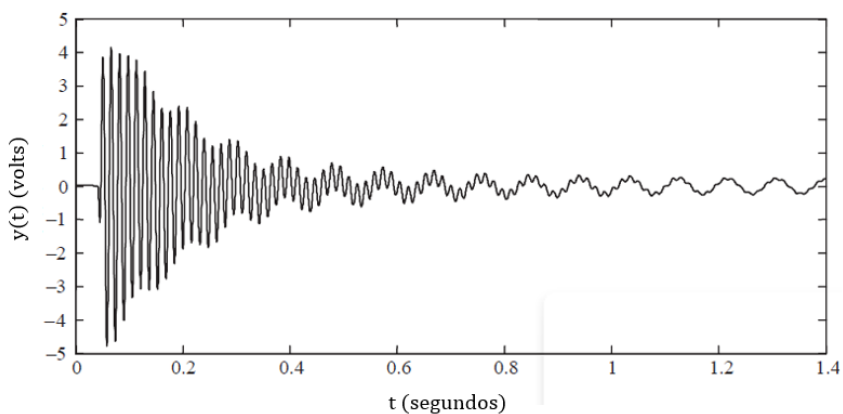


Figura 13. Setup para uma análise modal experimental [35]



a)



b)

Figura 14. a) Sinal de entrada do martelo piezoelétrico; b) sinal de saída das acelerações (Adaptado de Shin et al. [36])

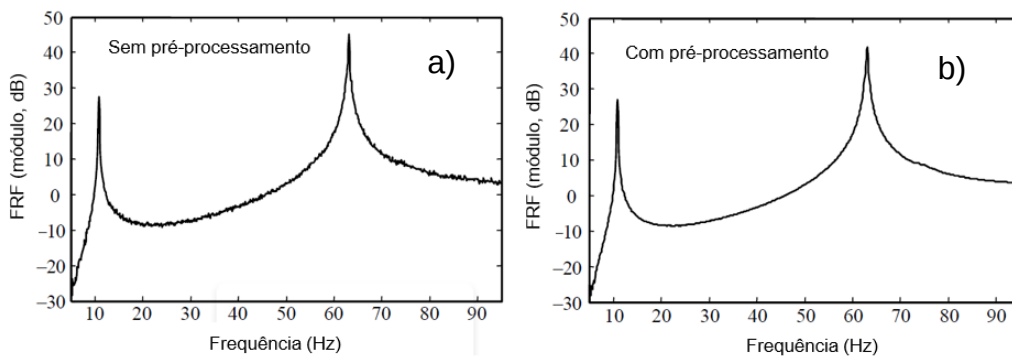
A função de transferência, definida como $H(s)$ pode ser utilizada para a caracterização dinâmica do meio, fornecendo as frequências de vibração, modos e taxas de amortecimento. Essa análise é possível através da

transformação do domínio do tempo para o domínio da frequência pela transformada de Fourier onde as funções $F(t)$ e $\alpha(t)$ se transformam em $F(f)$ e $A(f)$, respectivamente. Já a função $H(s)$ é transformada em $H(f)$ e é denominada então função de resposta em frequência (FRF), sendo definida conforme a equação (11) [35].

$$H(f) = \frac{A(f)}{F(f)} \quad (11)$$

Ao se realizar os ensaios, contudo, é possível evidenciar a existência de ruídos que podem atrapalhar o pós-processamento, oriundo das respostas de frequência individuais de sensores, efeitos dos ruídos de quantização, ruído de medição e do equipamento experimental [36]. Nesse sentido, é realizada a repetição dos ensaios onde a função de resposta e frequência é a média de todos os resultados, como visto na equação (12), onde N é o número de vezes que o experimento é replicado. Na Figura 15 são observados exemplos das funções de resposta em frequência sem tratamento e com pré-processamento e sua eficiência na estimativa com poucas médias, assim como a influência da utilização do estimador $H_1(f)$, mostrando sua importância na obtenção de resultados mais precisos e com menos ruído.

$$H_1(f) \approx \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N F_n^*(f) A_n(f)}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N F_n^*(f) F_n(f)} \quad (12)$$



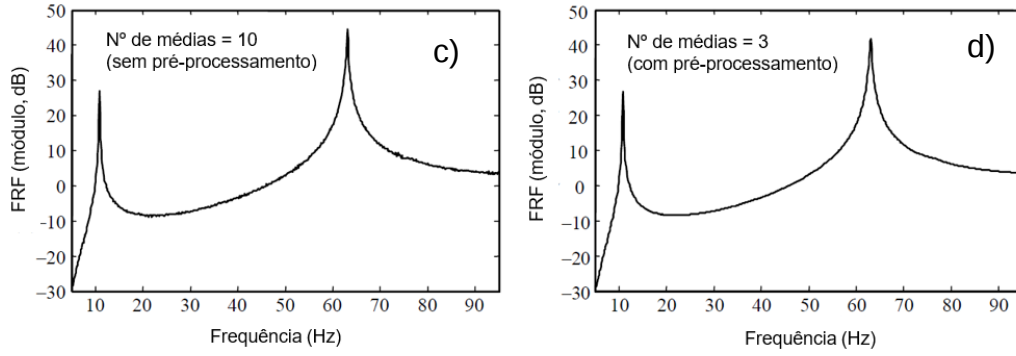


Figura 15. a) FRF sem pré-processamento; b) FRF com pré-processamento; c) FRF da média de 10 sinais; d) FRF com média de 3 sinais com pré-processamento (Adaptado de Shin et al. [36])

No caso de ensaios onde diversos pontos são estudados, é necessário utilizar alguma ferramenta para sintetizar os resultados de diversas FRFs. Dessa forma, foi desenvolvido um algoritmo baseado na decomposição dos autovetores (eigenvalue decomposition (ED)) ou decomposição do valor singular (SVD) denominado “*Complex Mode Indicator Function*” (CMIF), onde é possível identificar o número de frequências modais, principalmente quando existem modos repetidos ou muito próximos [37]. Este método inicialmente era aplicado através da multiplicação da matriz FRF pela sua hermitiana, mas percebeu-se que a utilização do SVD era mais prática e econômica por não precisar do produto $[H(f)]^H[H(f)]$ e seus consequentes problemas numéricos. Resumidamente, o CMIF pode ser definido pela expressão (13), onde $CMIF_k(f)$ é o k^o CMIF em função da frequência f ; $\Lambda_k(f)$ é o k^o autovetor da matriz normal da matriz FRF em função de f ; e $\Sigma_k(f)$ é o k^o valor singular da matriz FRF em função de f . De maneira geral, o gráfico da função CMIF indica os modos através dos picos no gráfico de magnitude pela frequência como visto na Figura 16.

$$CMIF_k(f) = (\Lambda_k(f))^{1/2} = \Sigma_k(f); \quad k = 1, 2, \dots \quad (13)$$

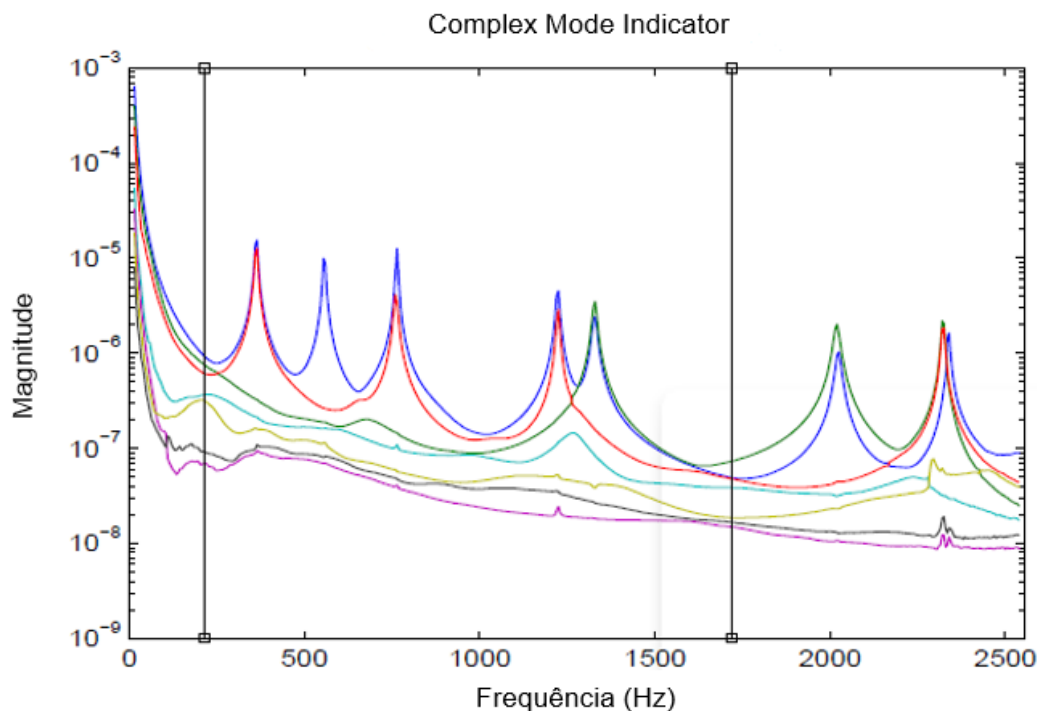


Figura 16. CMIF para um determinado sinal (Adaptado de Allemang et al. [37])

2.3.2. Estudos aplicados à análise modal de materiais compósitos

Kessler et al. [33] realizou um estudo sobre a detecção de patologia em materiais compósitos através de métodos de resposta de frequência, verificando a viabilidade desta técnica para o monitoramento da saúde da estrutura. Para isso, foram estudadas a capacidade de verificar diversos tipos de danos, a precisão em encontrar o local com defeito e a sensibilidade do sensor. Foram realizados experimentos e simulações numéricas em elementos finitos para validar os resultados encontrados.

Para o experimento, foram utilizados laminados produzidos com lâminas de grafite/epóxi em uma disposição $[90/+45/0]_s$. Em seguida, foram introduzidos vários danos aos elementos, como um furo de 6,4 mm de diâmetro, impacto com martelo, um ensaio de flexão em quatro pontos, a criação de delaminações e exposição à um carregamento cíclico com 2000 repetições.

Após a confecção das amostras, foi utilizado um vibrômetro a laser para medir as oscilações dos elementos e consequentemente suas frequências, além de utilizar também medições via impedância, cuja desvantagem em relação ao primeiro é a impossibilidade de definir a forma

do modo. Como fonte de excitação, foram utilizados aparelhos que variavam a frequência atuante de 0 a 20 kHz. Foi desenvolvido então um modelo controle em elementos finitos para determinar a frequência de resposta dos corpos de prova, sendo simulados todos os danos citados anteriormente.

Como resultados das medições utilizando o vibrômetro a laser, foram obtidas as frequências dos seis primeiros modos, encontradas na (Tabela 2a) e os mesmos modos encontrados através de um modelo numérico (Tabela 2b).

Tabela 2. Modos de vibração e suas frequências (Adaptado Kessler et al. [33])

Modo	Forma	Controle	Furo	Impacto	Delaminação	Fadiga	Flexão
1	1º Flexão	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
2	2º Flexão	78,1	78,1	76,5	78,1	75	76,3
3	1º Torção	157	148	147	137	146	137
4	3º Flexão	218	217	216	215	209	214
5	4º Flexão	423	423	423	428	413	423
6	2º Torção	461	453	453	451	428	432

a) Modos e frequências encontrados experimentalmente com o vibrômetro

Modo	Forma	Controle	Furo	Impacto	Delaminação	Fadiga	Flexão
1	1º Flexão	12,5	12,4	12,5	12,1	12,1	12,3
2	2º Flexão	77,8	77,2	77,5	75,5	73,7	76,3
3	1º Torção	157	155	156	149	150	154
4	3º Flexão	218	217	217	211	213	216
5	4º Flexão	428	425	426	412	413	422
6	2º Torção	476	473	474	465	466	472

b) Modos e frequências encontrados experimentalmente através do modelo numérico

Como é visto na Tabela 2, os resultados numéricos possuem uma boa correlação com os experimentais, além disso, pôde-se constatar através desses exemplos que de fato a presença de danos afetam as frequências naturais de vibração, sendo essa modificação não tão expressiva em modos baixos, mas sendo bem evidente nos modos de maior frequência. É visto também a dificuldade de diferenciar os danos, assim como o local e a direção onde ocorrem sem a utilização de vários sensores e simulações.

Russo [28] utilizou a técnica de análise modal baseada na curvatura de cada modo de vibração para avaliar danos e sua localização em perfis pultrudados de vinil-éster reforçados com 40% de E-glass. Quatro perfis com seções diferentes foram analisados na configuração bi-apoiada, excitados com um martelo piezoelétrico instrumentado e aquisitadas as acelerações com acelerômetro com faixa de frequência entre 0,1 e 12 kHz. O dano foi feito através de três cortes com alturas de 4% (D1), 8% (D2) e 50% (D3) da altura, localizados cerca de 20% do comprimento do vão.

O ensaio consistia em posicionar diversos acelerômetros ao longo do comprimento da viga de seções I, H e tubular quadrada e variar a posição do impacto para a obtenção dos vários dados. Os resultados experimentais dos elementos intactos e dos elementos danificados foram comparados entre si e com os resultados de modelos em elementos finitos usando elementos de casca isoparamétricos de quatro nós.

A comparação entre o modelo numérico e o resultado experimental intacto mostrou possuir boa correlação, tanto nas frequências obtidas quanto na forma modal, variando este último no máximo 1,57%. Já para as diferentes magnitudes de danos observou-se uma significativa variação da forma modal, como observado na Figura 17. As frequências, por sua vez, variaram cerca de 1,9% (D1), 3,8% (D2) e 8,7% (D3) para cada corte realizado e o modelo com MEF 0,07% (D1), 0,73% (D2) e 9,39% (D3) em relação ao CP intacto, mostrando a efetividade deste ensaio para avaliar o dano e sua localização.

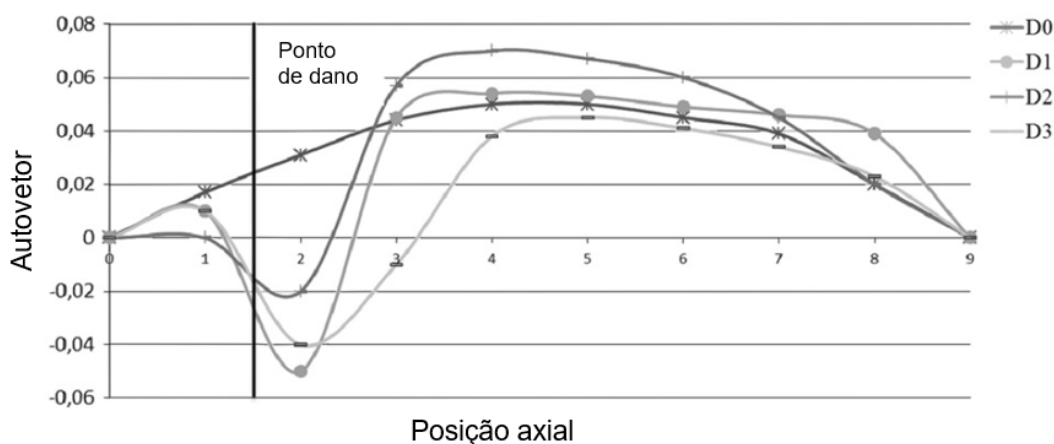


Figura 17. Formas modais intactas e danificadas (Adaptado Russo et al. [28])

No âmbito da caracterização do material através de ensaios de vibração, Gaspar et al. [27] obtiveram as constantes elásticas através de ensaios experimentais e a técnica de *model updating* para de um perfil “C” de resina éster vinílica reforçada com fibras tipo E-glass bi- engastado.

O ensaio de vibração livre consistiu em realizar 76 golpes com um martelo piezoelétrico ao longo do perfil instrumentado com apenas um acelerômetro uniaxial fixo, localizado de forma a captar o maior número de modos possíveis. Os resultados foram processados com o auxílio do software ARTeMIS[38], identificando os modos estáveis, entregando tanto as frequências de vibração quanto as formas modais.

Em seguida, os autores utilizaram a técnica de *model updating* com processo de otimização para estimar as propriedades elásticas do material através dos primeiros 9 modos de vibração. Para isso, foi utilizada uma interação entre uma rotina elaborada no Matlab e o modelo em elementos finitos de casca (SHELL281) desenvolvido com auxílio do software de análise estrutural ANSYS [39].

Os autores perceberam que o módulo longitudinal e o módulo de cisalhamento no plano variaram pouco ao considerar apenas os primeiros 4 modos e, ao considerar todos os 9 modos no processo de otimização, o módulo transversal apresentou maior variabilidade. Através desta metodologia de obtenção das propriedades elásticas, pôde-se comparar os valores obtidos com os de ensaios destrutivos, obtendo uma boa correlação uma vez que a diferença global entre os resultados variou 2,64%.

Mondal [40] caracterizou uma placa pultrudada de PRFV na configuração livre-livre através de ensaios experimentais e a técnica de *model updating*. A utilização da configuração livre-livre já foi comparada com resultados de elementos engastados e apresentou ter resultados mais precisos uma vez que é uma restrição mais simples de reproduzir [41]. Através da otimização, o autor obteve frequências praticamente iguais às experimentais e propriedades elásticas também próximas das obtidas em ensaios destrutivos, possuindo o módulo de cisalhamento maior diferença percentual.

Através dos estudos apresentados nesta breve revisão bibliográfica, é possível verificar a possibilidade da utilização de ensaios de vibração para a avaliação de danos causados pelo envelhecimento em perfis de PRF. Assim, principalmente justificado pela perda de rigidez causada pela degradação observada no item 2.2.5, este trabalho visa observar os danos causados pela presença de umidade, salinidade e elevada temperatura na rigidez de perfis pultrudados e sua respectiva influência nas propriedades dinâmicas do material por meio de técnicas de excitação por impulso.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Material utilizado

O material utilizado para os ensaios experimentais consiste em perfis pultrudados de vinil éster reforçado com fibras de vidro do tipo E-Glass. O elemento estrutural, visto na Figura 18, foi produzido no formato de cantoneira, com seção transversal de 102 x 6,4 mm, pela empresa Cogumelo© e caracterizado anteriormente por Togashi [42] (Tabela 3). Em relação as imperfeições iniciais, foi observado que os perfis adotados possuíam espessura das abas variando entre 6,6 mm e 6,4mm, além de uma pequena descontinuidade na junção entre as abas, oriundo do processo de pultrusão.

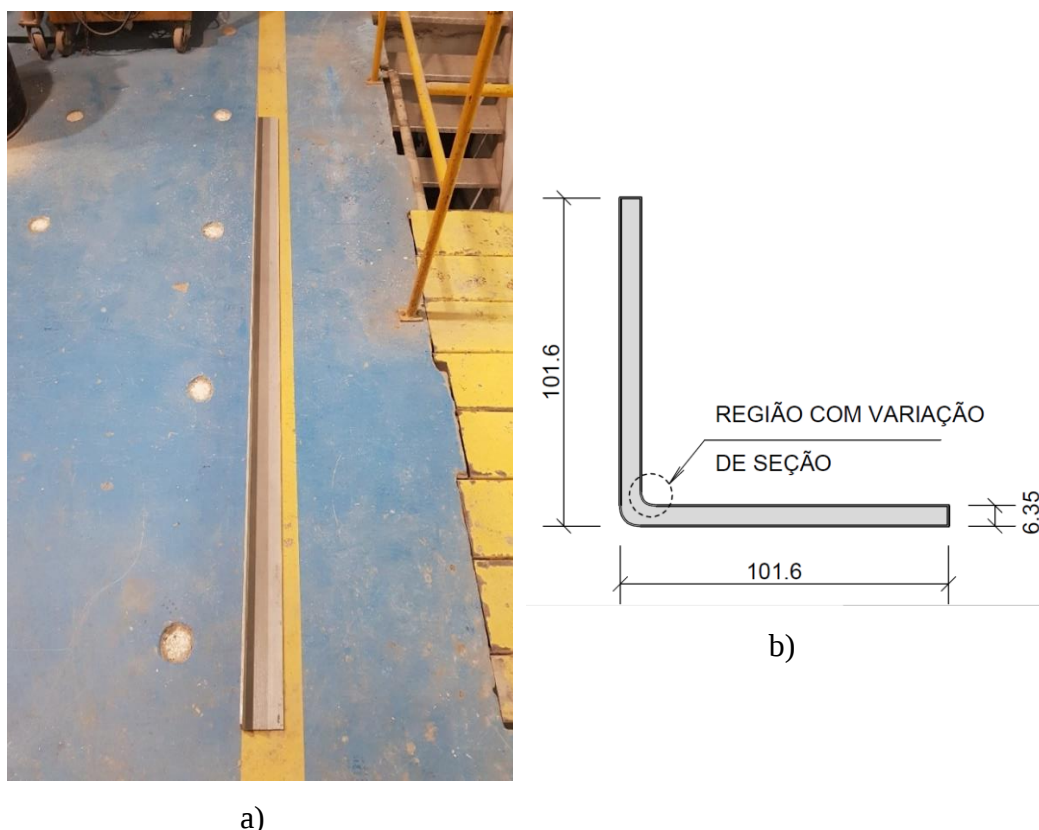


Figura 18. Perfil cantoneira de abas iguais utilizados nos ensaios. a) Perfil inteiro; b) Seção transversal (dimensões em mm).

Para a caracterização, foi utilizada a ASTM D638 [43] para a obtenção do módulo e resistência à tração; ASTM D6641 [44] para os de compressão, ASTM D790 [45] para o módulo de flexão longitudinal e

transversal. Os ensaios de torção pura realizados não seguiram as normas vigentes.

Tabela 3. Propriedades do perfil utilizado. Fonte: Adaptado Togashi et. al [42]

Propriedade			Valor
Volume de fibras	(%)	$V_{f,rov}$	$33,9 \pm 6,2$
Número de camadas de manta			3
Módulo longitudinal de tração	(GPa)	$E_{L,t}$	$27,8 \pm 2,5$
Resistência à tração longitudinal	(MPa)	$F_{L,t}$	360 ± 26
Módulo longitudinal de compressão	(GPa)	$E_{L,c}$	$30,4 \pm 4,7$
Resistência à compressão	(MPa)	$F_{L,c}$	286 ± 84
Módulo longitudinal de flexão	(GPa)	$E_{L,f}$	$20,1 \pm 1,3$
Módulo de flexão transversal	(GPa)	$E_{T,f}$	$8,60 \pm 0,80$
Módulo de cisalhamento	(GPa)	G_{LT}	$2,47 \pm 0,40$

3.2. Ensaio de caracterização por impulso através da resposta sonora

O ensaio de excitação por impulso, realizado no laboratório de materiais compósitos da PUC-Rio, utilizou o equipamento SONELASTIC© [46] para a determinação dos módulos de elasticidade à flexão e módulo de cisalhamento com base na ASTM E1876 [47]. O instrumento, apresentado na Figura 19, é montado de acordo com o setup para cada ensaio, sendo o de flexão com o martelo localizado na extremidade do corpo de prova e o microfone no seu meio, para excitar o modo de flexão, e o de cisalhamento com o martelo em um quadrante do CP e o microfone do lado oposto, excitando o modo torcional. O equipamento então realiza impactos automáticos, definidos pelo usuário, através do pulsador, onde o som emitido é captado pelo microfone para posterior processamento.

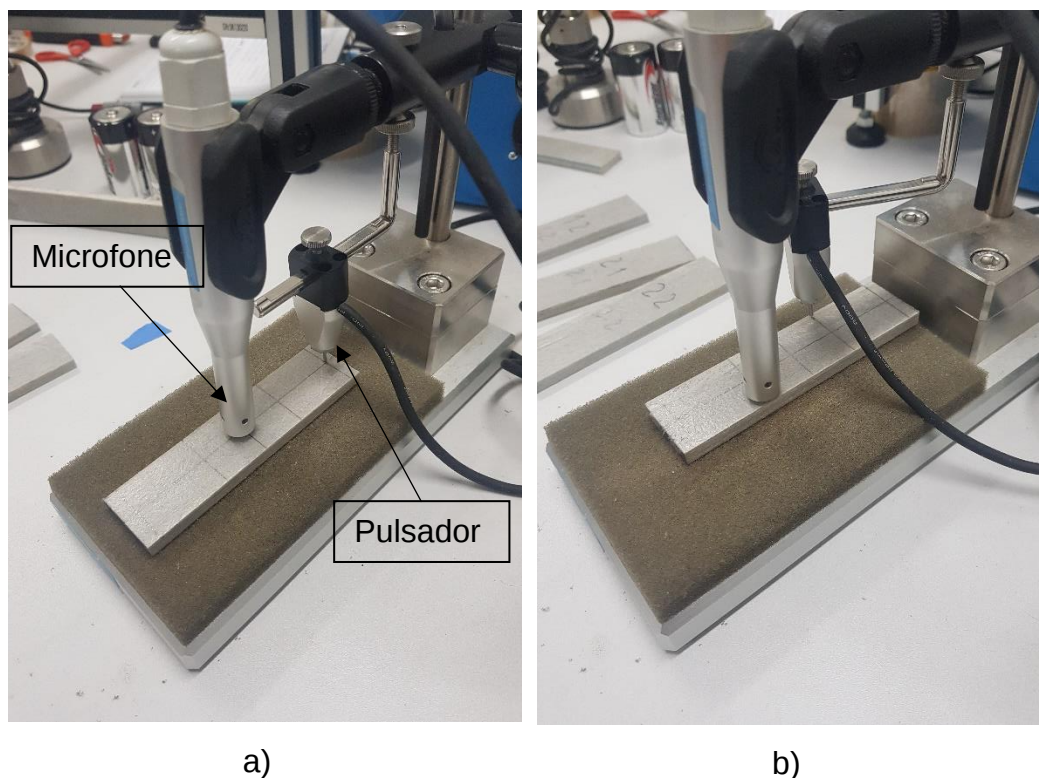


Figura 19. Setup utilizado no SONELASTIC para a) ensaio de flexão e b) ensaio de cisalhamento

Após montar o setup, o software é calibrado para filtrar os sinais obtidos após o impacto a fim de garantir maior precisão para a obtenção das frequências. Com base nas propriedades geométricas dos elementos como dimensões e a massa, são utilizadas correlações definidas em norma para determinação das propriedades elásticas em função da frequência de pico [48] (equações 14 e 15).

$$E = 0,9465 \left(\frac{m f_f^2}{b} \right) \left(\frac{L^3}{t^3} \right) T_1 \quad (14)$$

$$G = \left(\frac{4 L m f_t^2}{b t} \right) R \quad (15)$$

Onde:

E = Módulo de elasticidade flexional

G = Módulo de cisalhamento

m = massa da barra

b = Largura da barra

L = Comprimento da barra

t = Espessura da barra

f_f = Frequência fundamental para a barra em modo flexional

f_t = Frequência fundamental para a barra em modo torcional

T_1 = Fator de correção apresentado no manual do equipamento

R = Fator de correção apresentado no manual do equipamento

Através dessa técnica não destrutiva, é possível avaliar a degradação no material compósito pela redução das constantes de engenharia em relação ao corpo de prova intacto.

3.2.1. Preparo do corpo de prova

Para a confecção dos corpos de prova (CPs), foram seguidas as relações entre espessura, comprimento e largura definidas no manual de utilização do SONELASTIC®. Foram então cortados quatro corpos de prova, dois de cada aba e com o sentido das fibras longitudinal, de dimensões 110 x 28 x 6,4 mm, como ilustrado na Figura 20 e Figura 21.

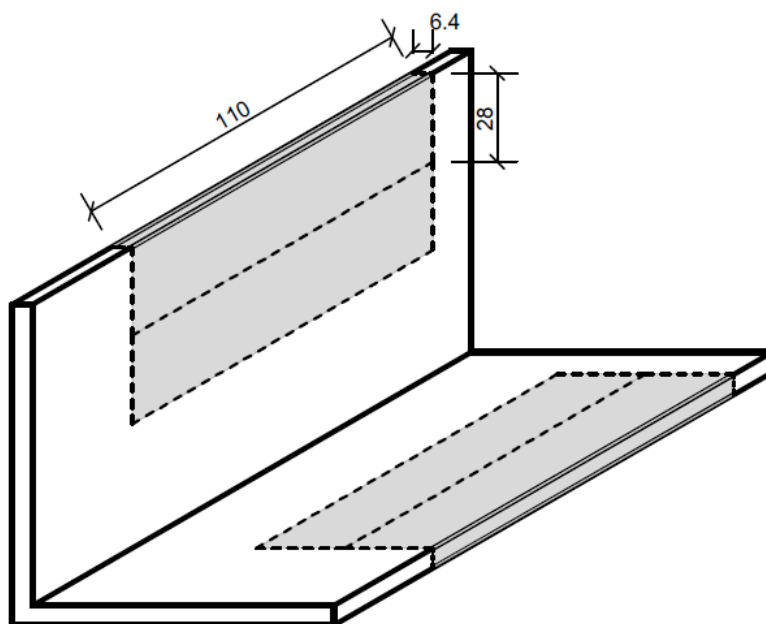


Figura 20. Região do perfil de onde os CPs foram cortados (dimensões em mm).

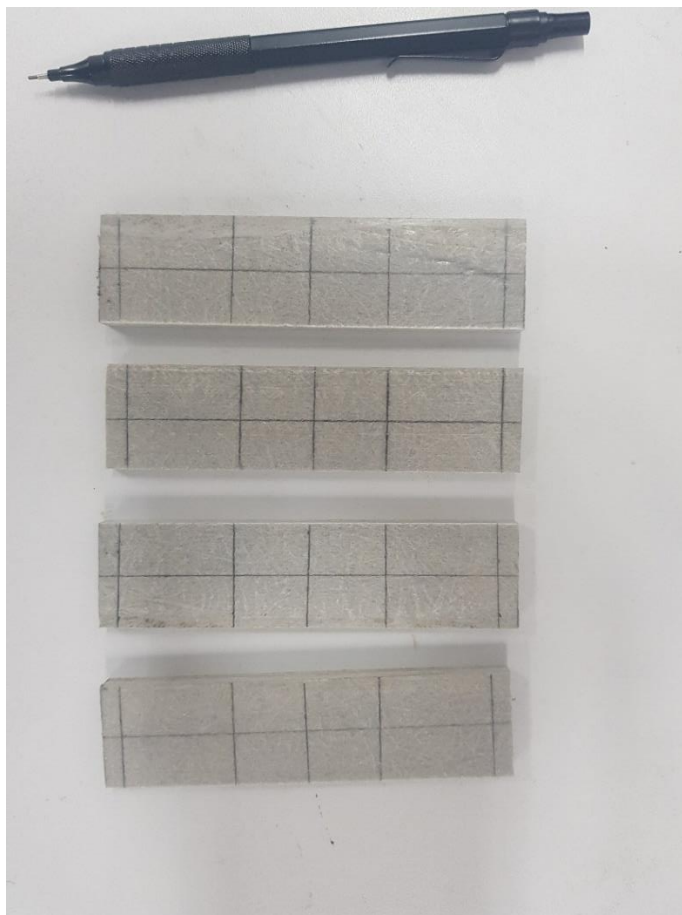


Figura 21. Corpos de prova utilizados nos ensaios do SONELASTIC

A superfície lateral dos CPs foi protegida com resina epóxi para reduzir a penetração de umidade pela parte cortada do perfil, gerando uma difusão preferencialmente unidirecional (através da espessura). Além disso, todos os corpos de prova foram medidos com paquímetro e pesados para a obtenção da massa específica seca.

3.2.2. Procedimento experimental

De início, foi feita uma bateria de ensaios utilizando o SONELASTIC para encontrar os valores de controle para as propriedades dos CPs antes do envelhecimento. Nessa etapa, assim como as demais, foram executados dois ensaios em cada corpo de prova, um para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal à flexão e o outro para determinar o módulo de cisalhamento. Cada ensaio é caracterizado pela média de 20 impactos do martelo automático.

Após a caracterização inicial, os corpos de prova foram colocados em câmaras de envelhecimento por névoa salina da seguinte forma: dois CPs, nomeados 35°C-1 e 35°C-2 foram colocados em câmaras sob temperatura de 35°C e outros dois CPs, 70°C-3 e 70°C-4 foram acondicionados em câmara sob temperatura nominal de 70°C.

As câmaras foram fabricadas pela empresa Equilam e montadas no laboratório de materiais compósitos da PUC-Rio, sendo apresentadas na Figura 22. Ambas possuem o controle de temperatura, umidade e salinidade para reproduzir o ambiente marinho, no qual grande parte dos elementos de compósito é utilizado. As umidades variavam em torno de 90% e 100% e a salinidade de 4% a 6% em ambas as câmaras, de 35°C e a de 70°C. A maresia artificial ou *Salt Spray* foi fabricada através da adição de cloreto de sódio, com tolerância de impurezas de 0,3%, em 95 partes de água, gerando uma solução com concentração variando entre 4% e 6%, de forma a seguir as recomendações da ASTM B117 [49]. As câmaras armazenavam simultaneamente corpos de prova de diversas pesquisas.



Figura 22. a) Câmaras utilizadas para o envelhecimento; b) visão interna das câmaras

Os quatro CPs permaneciam nas câmaras entre os ensaios e eram então retirados para realização de novos experimentos para avaliar a degradação. Assim que os elementos eram retirados do ambiente de envelhecimento, toda sua superfície era enrolada com filme plástico para

evitar perda de umidade, sendo retirado apenas no momento de cada ensaio. Antes dos ensaios, as amostras tiveram sua superfície seca com papel toalha. Após a realização dos ensaios de flexão e de cisalhamento, eles eram embrulhados novamente no filme plástico até serem armazenados nas câmaras para início de mais um período de envelhecimento. Ao todo, os corpos de provas ficaram 136 dias expostos nas câmaras, totalizando três retiradas, uma aos 33 dias, a segunda aos 66 dias e a terceira aos 136 dias.

Em cada retirada, os quatro CPs adotados para os ensaios sonoros foram pesados imediatamente antes de cada ensaio, a fim de estudar a absorção de água. Os espécimes utilizados não seguiram as recomendações da norma de absorção (ASTM D570-96 [50]) uma vez que sua geometria e a dinâmica de ensaio foram definidas para obter maior eficiência no ensaio utilizando o SONELASTIC.

A absorção de água foi calculada então com a seguinte expressão:

$$absorção = \frac{m_u - m_s}{m_s} \quad (16)$$

Onde m_u é a massa do CP úmido e m_s é a massa do CP seco.

As temperaturas foram medidas ao longo de todo o período, sendo que na câmara de 35°C a temperatura se manteve constante a maior parte do tempo, possuindo uma média de 35,6°C com desvio padrão de 0,4°C. Já no caso da câmara de 70°C, a média de temperatura foi de 60,86°C e o desvio padrão de 6,82°C. A temperatura de 70°C corresponde ao limite superior da câmara e seu controle ao longo dos ensaios apresentou maior instabilidade.

3.3. Ensaio de caracterização por impulso através da resposta em frequência

3.3.1. Preparo do corpo de prova

Os corpos de prova para esta etapa foram retirados do mesmo perfil dos CPs da Figura 21. Dois espécimes, um para cada câmara de

envelhecimento, e denominados perfil 1-35°C e perfil 2-70°C, foram fabricados com comprimentos de 80 cm, conforme Figura 23.

O processo de envelhecimento foi semelhante ao realizado no item 3.2.2, permanecendo 136 dias expostos a temperaturas nominais de 35°C e 70°C com elevada umidade e salinidade, tendo retiradas aos 33 dias, 66 dias e 136 dias. Ao contrário dos espécimes utilizados no SONELASTIC, que ficaram em uma das prateleiras, os perfis perfil 1-35°C e perfil 2-70°C repousaram pendurados por barbantes com seu vértice virado para cima, evitando o acúmulo de água e sal (Figura 23).



Figura 23. Perfil utilizado no ensaio de vibração com resposta em frequência sendo colocado na câmara de envelhecimento. (perfil íntegro)

3.3.2. Análise preliminar através do modelo numérico

Para a realização de um ensaio de vibração, é importante ter em mente o comportamento dinâmico esperado da estrutura para elaborar o plano de instrumentação, observando as suas principais formas modais e

a faixa de frequência. Essas informações são importantes para conhecer os nós dos autovetores e a posição ideal para que o acelerômetro capte a maior quantidade de modos. Por isso, foi elaborado inicialmente um modelo numérico utilizando o método dos elementos finitos (MEF), no software ANSYS [39] para a obtenção dos parâmetros dinâmicos, isto é, suas frequências naturais e modos de vibração através da análise modal.

O modelo, visto na Figura 24, foi elaborado com elementos de casca SHELL281 de oito nós indicados para paredes finas e medianamente finas [51]. A malha utilizada satisfaz o teste de convergência apresentando diferença entre as frequências em duas etapas consecutivas a partir da terceira casa decimal e consistiu em elementos de aproximadamente 5 mm, com seus eixos locais orientados de acordo com a direção das fibras (eixo x é longitudinal e denominado eixo principal). Além disso, foi considerada a condição livre-livre para o perfil, não definindo nenhum tipo de restrição ao modelo. A ausência das restrições tanto no modelo numérico quanto nos ensaios experimentais visou reduzir as dificuldades na caracterização das condições de apoio, sendo um facilitador em ensaios de campo.

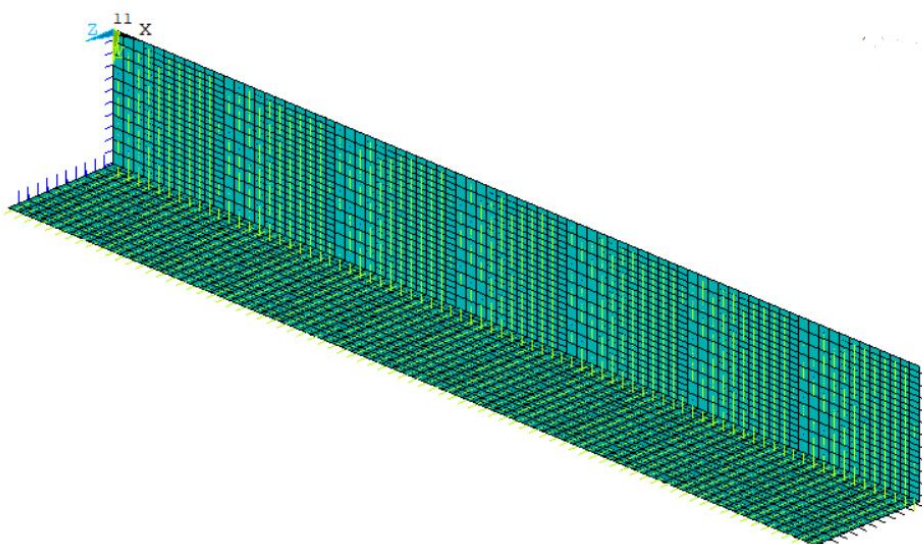


Figura 24. Modelo numérico discretizado da cantoneira

O material foi considerado transversalmente isotrópico como indicado na literatura, uma vez que possui as fibras predominantemente uniaxiais, gerando um eixo de simetria [51,52]. Assim, foram consideradas cinco constantes elásticas: E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12} e ν_{23} ; onde E_1 é o módulo de elasticidade na direção da fibra, E_2 é o módulo de elasticidade transversal

as fibras, G_{12} é o módulo de cisalhamento no plano, ν_{12} o coeficiente de Poisson no plano e ν_{23} o coeficiente de Poisson fora do plano. Como o plano 2-3 é isotrópico, tem-se:

$$E_L = E_1 \quad (17)$$

$$E_T = E_2 = E_3 \quad (18)$$

$$G_{LT} = G_{12} = G_{13} \quad (19)$$

$$\nu_{LT} = \nu_{12} = \nu_{13} \quad (20)$$

$$G_{23} = \frac{E_2}{[2(1 + \nu_{23})]} \quad (21)$$

$$\nu_{TL} = \nu_{21} \quad (22)$$

$$\nu_{TL} = \frac{E_2}{E_1} \nu_{LT} \quad (23)$$

As propriedades utilizadas no modelo foram as encontradas experimentalmente por Togashi [42] e resumidas na Tabela 4, sendo o coeficiente de Poisson fora do plano estabelecido como 0,385 (ν_{23}) e o maior coeficiente de Poisson igual a 0,32, onde este último foi encontrado experimentalmente por Gaspar [27] em um perfil “C” de vinil éster reforçado com E-glass [27,51]. A massa específica utilizada foi considerada a média dos perfis utilizados na análise do Sonelastic (ver Seção 3.2) .

Tabela 4. Propriedades utilizadas no modelo numérico

Propriedade		Símbolo	Valor
Módulo longitudinal de tração	(GPa)	E_L	27,8
Módulo de flexão transversal	(GPa)	E_T	8,60
Módulo de cisalhamento no plano	(GPa)	G_L T	2,47
Módulo de cisalhamento fora do plano	(GPa)	G_{23}	3,10
Maior coeficiente de Poisson		ν_{LT}	0,32
Menor coeficiente de Poisson		ν_{TL}	0,10
Massa específica	(kg/m ³)	ρ	1650,0

3.3.3. Procedimento experimental

Para caracterizar a condição livre-livre, as vigas foram penduradas através de elásticos com baixa rigidez, como observado na literatura [53,54] a fim de criar uma situação de fácil reprodução em campo. Os ganchos dos elásticos foram fixados sob a laje de reação do Laboratório de Estruturas e Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, como visto na Figura 25 a). Os elásticos eram enrolados e presos cerca de 6 cm das extremidades dos perfis, de forma que não fosse observado nenhuma acomodação posterior (Figura 25 b)). Outro procedimento adotado foi o nivelamento do elemento estrutural, conforme mostrado na Figura 25 c).



a)



b)



c)

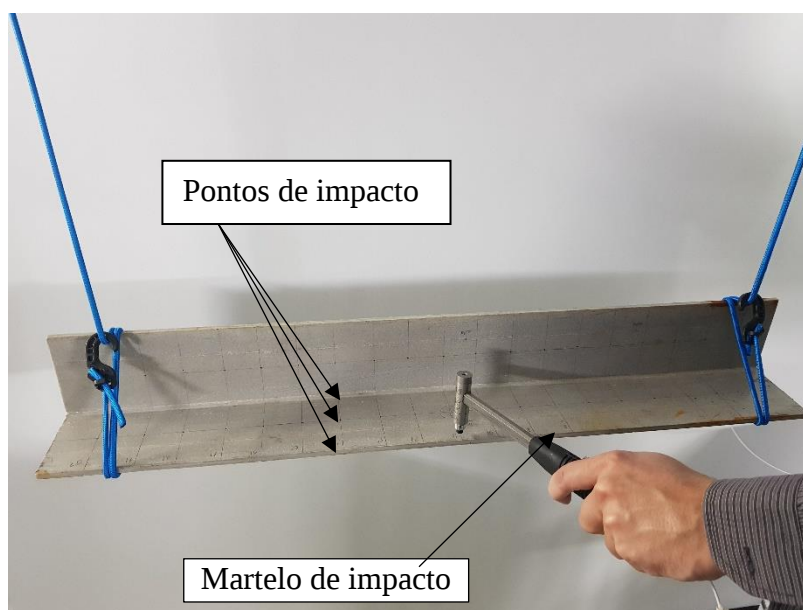


d)

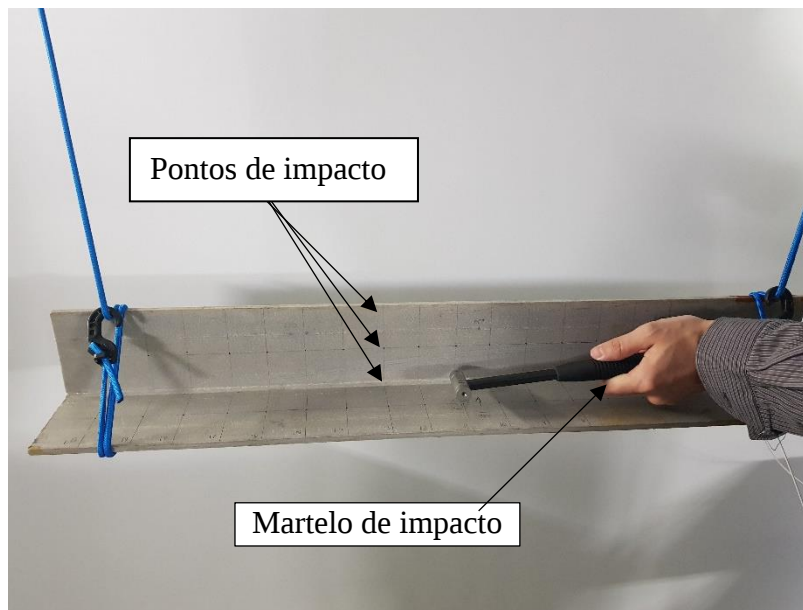
Figura 25. Configuração livre-livre de ensaio; a) apoio na laje de reação; b) fixação dos elásticos no perfil; c) nivelamento do perfil; d) visão geral do ensaio

Após a definição da configuração, os perfis foram divididos em 126 pontos para a realização do ensaio de vibração livre, onde cada ponto era excitado três vezes, obtendo-se, portanto, a função de resposta em frequência (FRF) média para cada um [55]. Essa “malha” densa de pontos foi definida para quantificar de forma mais precisa o efeito local dos danos devido o envelhecimento além de identificar possíveis heterogeneidades que o material poderia ter, por ter suas propriedades variando ao longo do perfil. Como visto na Figura 26, impactos nas abas horizontais e verticais foram realizados através de um martelo piezoelétrico PCB Piezotronics 086C03 e os resultados na forma de acelerações captados por um acelerômetro uniaxial voltado para o eixo z (na direção da gravidade) com faixa de frequências de 0,5 Hz até 3000 Hz (Figura 27) e fixados nos espécimes através de uma resina.

O acelerômetro PCB 333B40 possui 7,5 gramas e foi instalado a cerca de 2,5 cm do eixo da aba vertical, lugar esse escolhido por meio da análise do modelo numérico em elementos finitos visando captar os modos de forma a se evitar a influência de sua massa nos pontos de maior amplitude modal e, ao mesmo tempo, tendo em conta a relação sinal/ruído da localização escolhida.



a) Impacto vertical



b) Impacto horizontal

Figura 26. Impactos para a realização do ensaio de vibração livre



Figura 27. Fixação do acelerômetro

Durante a realização dos ensaios, os sinais eram transmitidos por cabos coaxiais até o sistema de aquisição de dados (cDAQ-9174 da National Instruments), conectado ao computador e ao software ARTeMIS [38] (Figura 28).

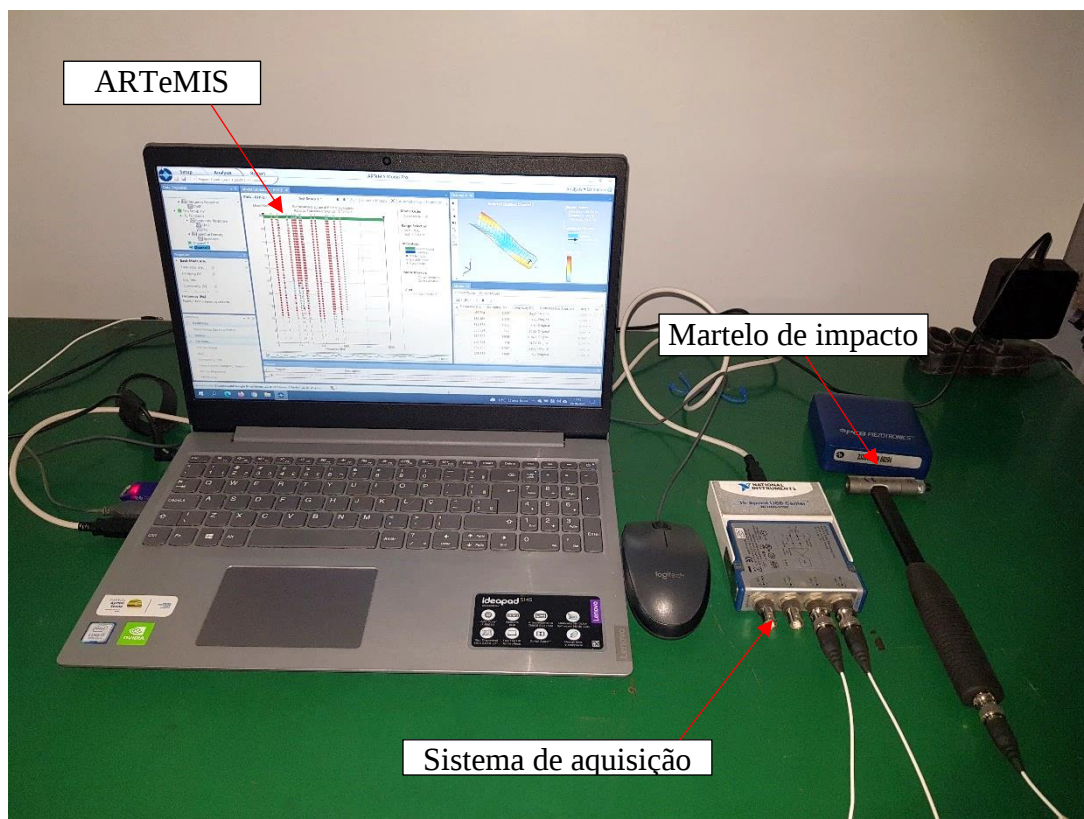


Figura 28. Setup utilizado para os ensaios

O ARTeMIS por sua vez, é um software com aplicações em análise modal operacional, análise modal experimental e monitoramento da saúde da estrutura, podendo processar os modos e frequências de vibração, massa modal e taxa de amortecimento. Primeiramente, é feito o modelo geométrico da estrutura assim como a definição da posição do acelerômetro e de cada impacto. Após a realização do experimento, onde cada ponto é excitado três vezes, os sinais obtidos foram captados com uma frequência de amostragem de 2000 Hz, com intervalo entre golpes de 2,05 s.

Para gerar a média das 126 funções de resposta em frequência (FRF), obtidos através dos sinais de aceleração e do impacto do martelo, a função CMIF (complex mode indicator function) foi utilizada a fim de obter

os principais modos de cada sinal, contabilizando todas as FRFs em um único gráfico. Além disso, o método Rational Fraction Polynomial in Z domain (RFP-Z) foi utilizado para identificar os modos de vibração experimentais através da estabilização e separação dos modos físicos e estáveis e dos instáveis e ruídos. A Figura 29 mostra o resultado de um teste para fins de ilustração e calibração do ensaio. Nele, é possível observar as frequências em função da ordem do modo (definida como 50), onde a função CMIF é observada através da curva azul ao fundo, mostrando por meio dos picos as frequências obtidas para uma faixa de frequências de 800 Hz. Também é possível observar os modos estáveis representados pelos círculos vermelhos, os instáveis pelos triângulos verdes e os ruídos representados pelos losangos beges.

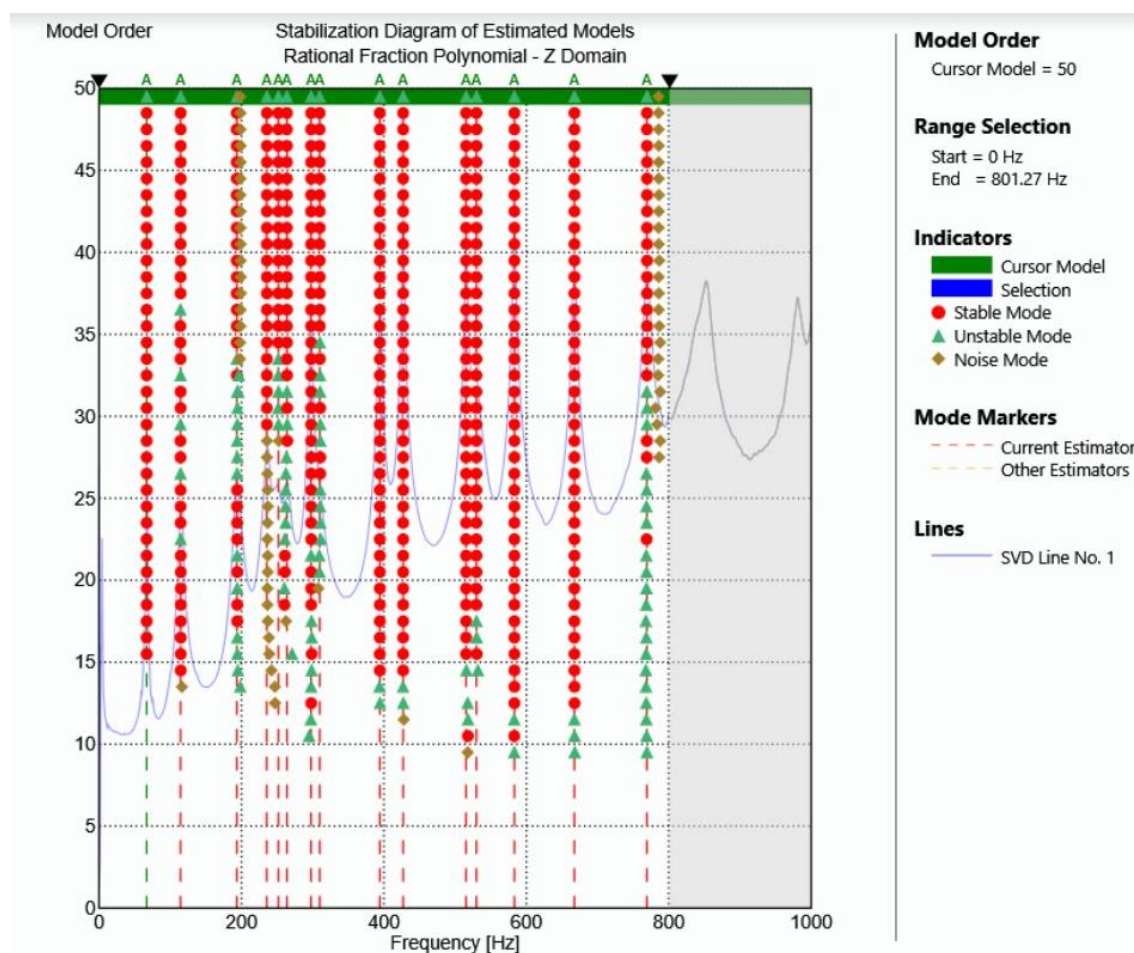


Figura 29. Diagrama típico de estabilização das funções de resposta em frequência para o ensaio preliminar

4. RESULTADOS

4.1. Aspectos físicos das amostras

Foi evidenciado de forma mais acentuada os impactos do ambiente agressivo na aparência física dos CPs, comparados aos de menor tamanho. Como é visto na Figura 30, a partir da primeira retirada, os elementos já começaram a ter sua coloração alterada, ocasionada pela oxidação da resina. Já as manchas presentes nos elementos submetidos à câmara de 35°C são decorrentes da oxidação das placas de aço utilizadas para outras pesquisas. Apesar das manchas no perfil 1-35°C serem mais delimitadas, devido à presença de água condensada e oxidação, o perfil 2-70°C apresentou alteração da tonalidade de forma mais homogênea, visto na Figura 32b) e Figura 30, perdendo um pouco de brilho e ficando com uma cor mais acobreada. Na última retirada, referente ao tempo de 136 dias, é observado mudanças significativas, principalmente no elemento da câmara de 70°C. Como ilustrado na Figura 31, além do alto grau de oxidação, foi observado um acúmulo significativo de cristais de sal, algo não observado na câmara mais branda.

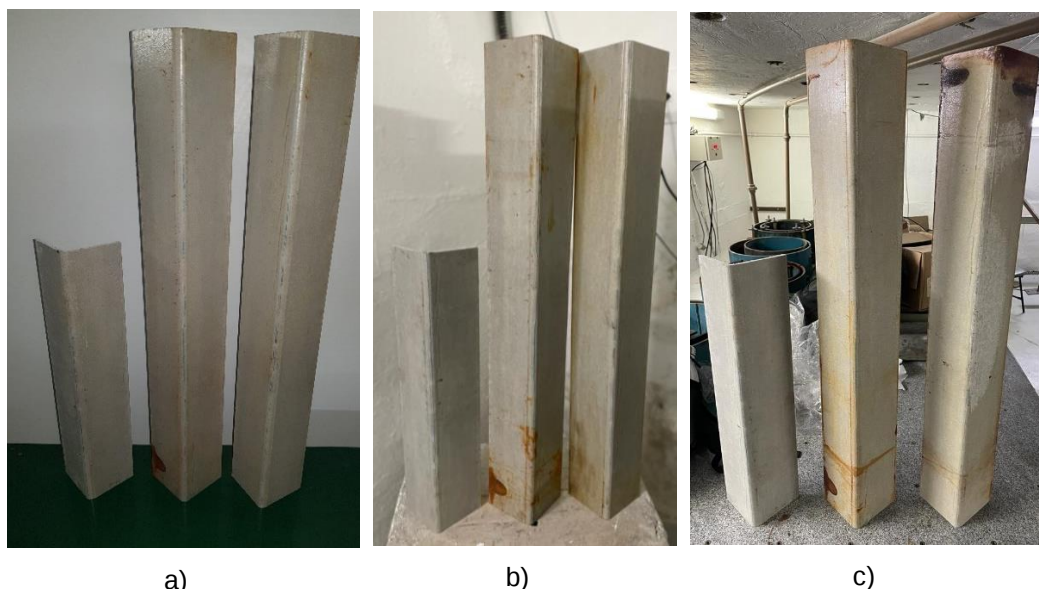


Figura 30. Visão dos perfis após o envelhecimento de a) 33 dias; b) 66 dias e c) 136 dias. Sendo o perfil intacto o da extrema esquerda, o perfil da câmara de 35°C no centro e o da câmara de 70°C na direita

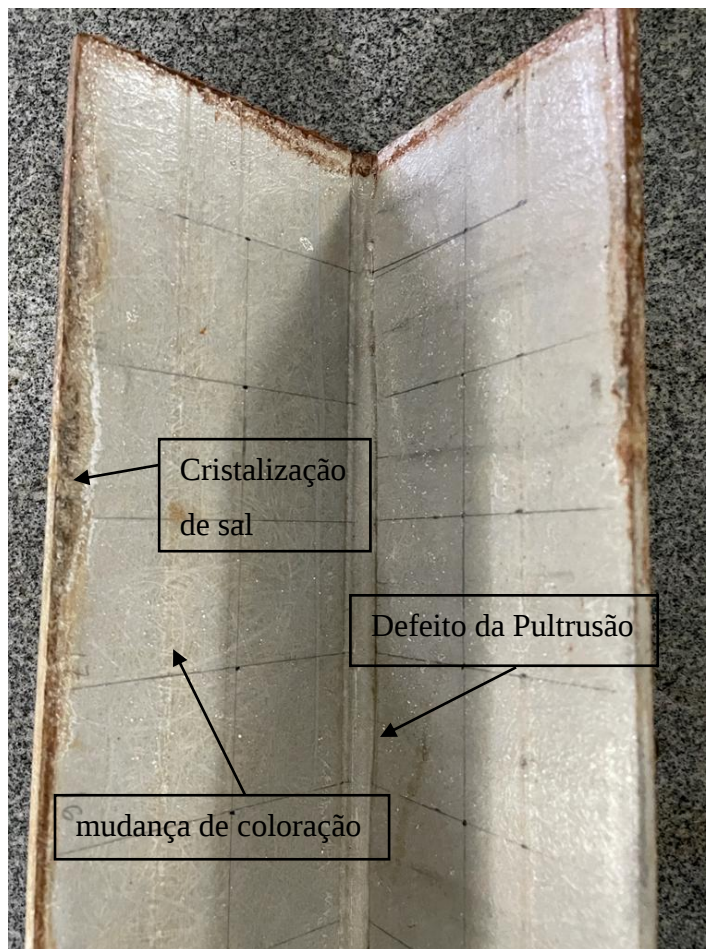


Figura 31. Presença de oxidação elevada e cristalização de sal na superfície do perfil degradado à 70°C e aos 136 dias



a)



b)

Figura 32. Comparação da tonalidade dos perfis da câmara de a) 35°C e b) 70°C aos 136 dias

4.2. Resultados da absorção de umidade

Como é visto na Figura 33, para os corpos de prova envelhecidos na câmara de 35°C, houve um ganho quase linear de massa, representando uma absorção de água com uma taxa praticamente constante até os 66 dias. Além disso, a maior absorção do CP 35°C-2 em relação ao CP 35°C-1 pode ser justificado pela menor massa específica do elemento, o que significa menor volume de fibras e maior quantidade de vazios em sua composição. Uma menor proporção de fibras gera um aumento da parte de resina, material esse permeável, e que pode possuir grande quantidade de vazios em função do processo de fabricação. Dessa forma, é previsível que um CP com essas características absorva maior quantidade de água.

Já para os elementos envelhecidos na câmara de 70°C, foi observada uma absorção mais acentuada, representada pela inclinação da reta do gráfico até os 33 dias. Entre os 33 e os 66 dias, é evidenciado um platô, podendo ser definido como o ponto de saturação onde a partir daí não há mais absorção de água. Ao contrário dos CPs envelhecidos a 35°C, os de 70°C atingiram muito mais rápido a saturação, uma vez que a temperatura é um fator que acelera o processo de difusão nos compósitos [7,8]. Além disso, a maior absorção também foi evidenciada no corpo de prova com menor massa específica, assim como os espécimes submetidos à câmara mais branda.

Entre os 66 dias e os 136 é possível notar uma estabilização da absorção representando a saturação para os CPs de 35°C. Já os de 70°C apresentam uma grande redução de massa podendo ser explicada pelo efeito da hidrólise já vista na literatura [7,8]. Um ponto bem interessante é ilustrado pelos CPs 70°C-4 e 35°C-2 onde atingem a saturação praticamente com a mesma quantidade de água absorvida. Como a massa específica de ambos é muito próxima, a alta temperatura da câmara de 70°C faria com que o estágio de saturação do CP 70°C-4 fosse atingido de forma mais rápida que o de 35°C-2, sendo o valor final igual para os dois. Essa expectativa de fato aconteceu como visto pela linha tracejada perto dos 2% na Figura 33

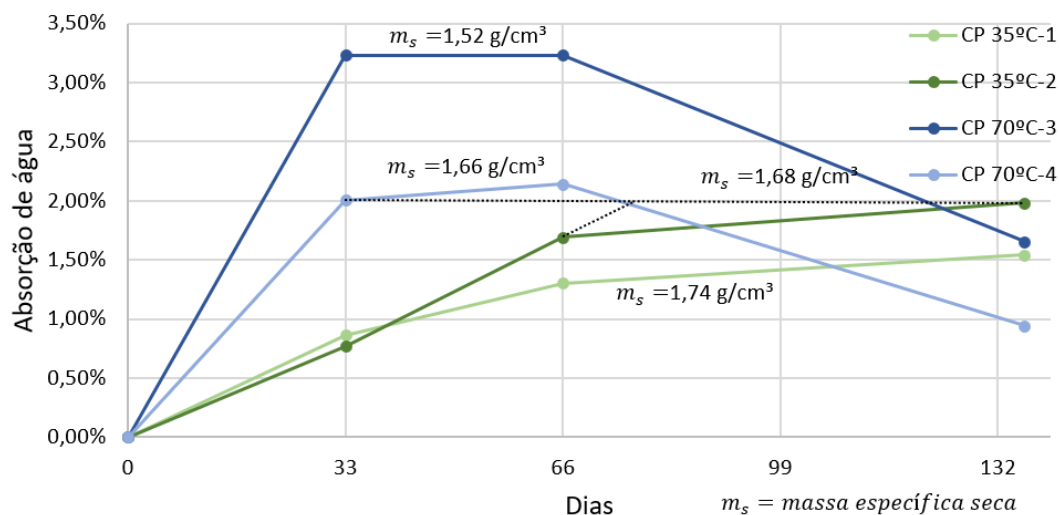


Figura 33. Absorção de água ao longo do envelhecimento para os 4 CPs

4.3. Resultados obtidos no ensaio de caracterização por impulso através da resposta sonora

Ao analisar a variação do módulo de elasticidade à flexão (Figura 34 e Tabela 5) percebe-se inicialmente uma redução da propriedade em todos os CPs aos 33 dias de envelhecimento. A maior redução foi observada no CP com menor massa específica (CP 70°C-3) e consequentemente maior absorção de água.

Após os 33 dias, os CPs manifestaram resultados diferentes. Os CPs 35°C-1 e 70°C-4 apresentaram degradação até pelo menos os 66 dias. Com relação ao CP 35°C-2, este manteve suas propriedades até os 136 dias, após o dano inicial. Já os CPs 70°C-3 e os 35°C-1 e 70°C-4 após os 66 dias apresentaram ganho de rigidez, possivelmente ocasionado pelo efeito de pós cura, onde as ligações cruzadas entre cadeias do polímero foram formadas na presença de temperatura elevada. A maior perda observada foi de cerca de 27% e o maior ganho de 12%

Tabela 5. Módulo de elasticidade à flexão dos CPs submetidos à caracterização por resposta Sonora e seus respectivos desvios padrões

Módulo de elasticidade à flexão (GPa)				
Dias	35°C-1	35°C-2	70°C-3	70°C-4
0	24,35 ± 0,29	23,32 ± 0,39	18,64 ± 0,25	21,85 ± 0,37
33	23,24 ± 0,63	19,51 ± 0,53	13,60 ± 0,19	20,54 ± 0,57
66	21,22 ± 0,57	19,50 ± 0,68	14,69 ± 0,53	19,18 ± 0,83
136	23,82 ± 0,81	19,52 ± 0,74	15,68 ± 0,52	19,89 ± 0,70

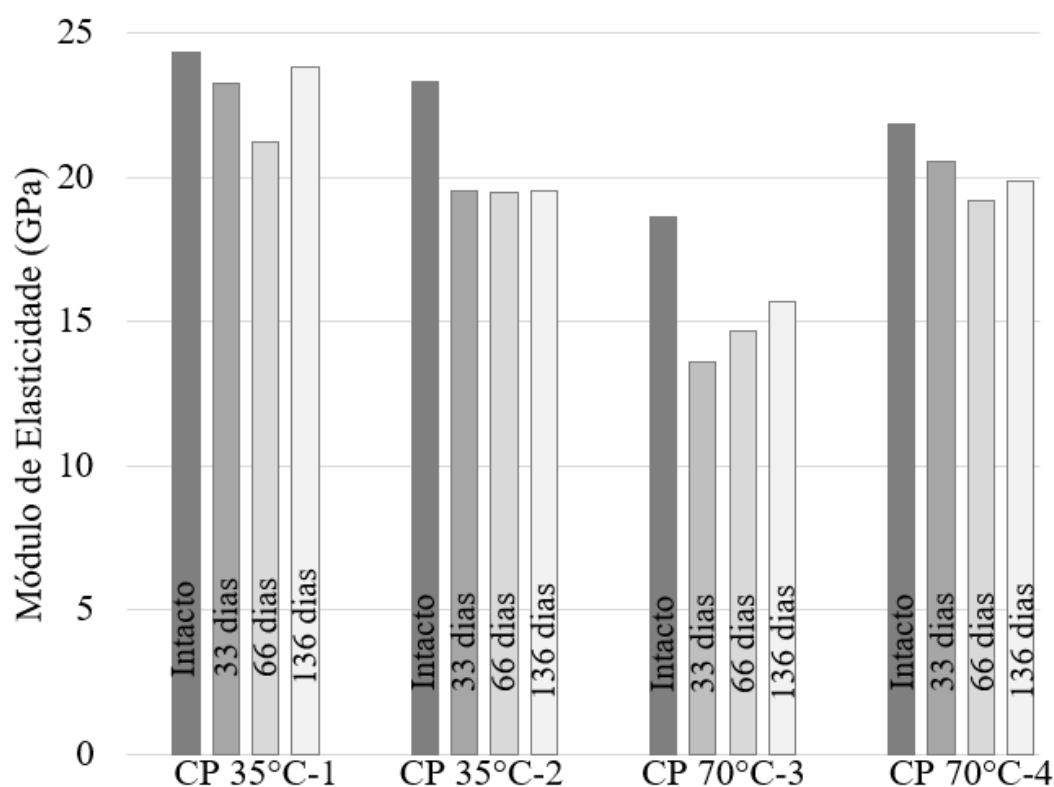


Figura 34. Variação do módulo de elasticidade à flexão ao longo do envelhecimento

Ao avaliar a degradação do módulo de cisalhamento (Figura 35 e Tabela 6), um resultado parecido ao citado anteriormente foi observado. Até os 33 dias, todos os CPs apresentaram perda da propriedade, sendo que o CP 70°C-4 apresentou a redução até os 66 dias. Os CPs 35°C-1 e 70°C-3 se mantiveram constante até os 66 dias e, em seguida, todos os espécimes aumentaram a rigidez ao cisalhamento. A maior perda observada foi de cerca de 13%, enquanto o maior ganho foi de 9%.

Tabela 6. Módulo de cisalhamento dos CPs submetidos à caracterização por resposta Sonora e seus respectivos desvios padrões

Módulo de cisalhamento (GPa)				
Dias	35°C-1	35°C-2	70°C-3	70°C-4
0	3,86 ± 0,02	3,45 ± 0,04	2,99 ± 0,01	3,58 ± 0,04
33	3,62 ± 0,03	3,14 ± 0,02	2,63 ± 0,03	3,28 ± 0,03
66	3,60 ± 0,03	3,20 ± 0,08	2,63 ± 0,05	3,13 ± 0,04
136	3,74 ± 0,04	3,28 ± 0,03	2,75 ± 0,17	3,42 ± 0,02

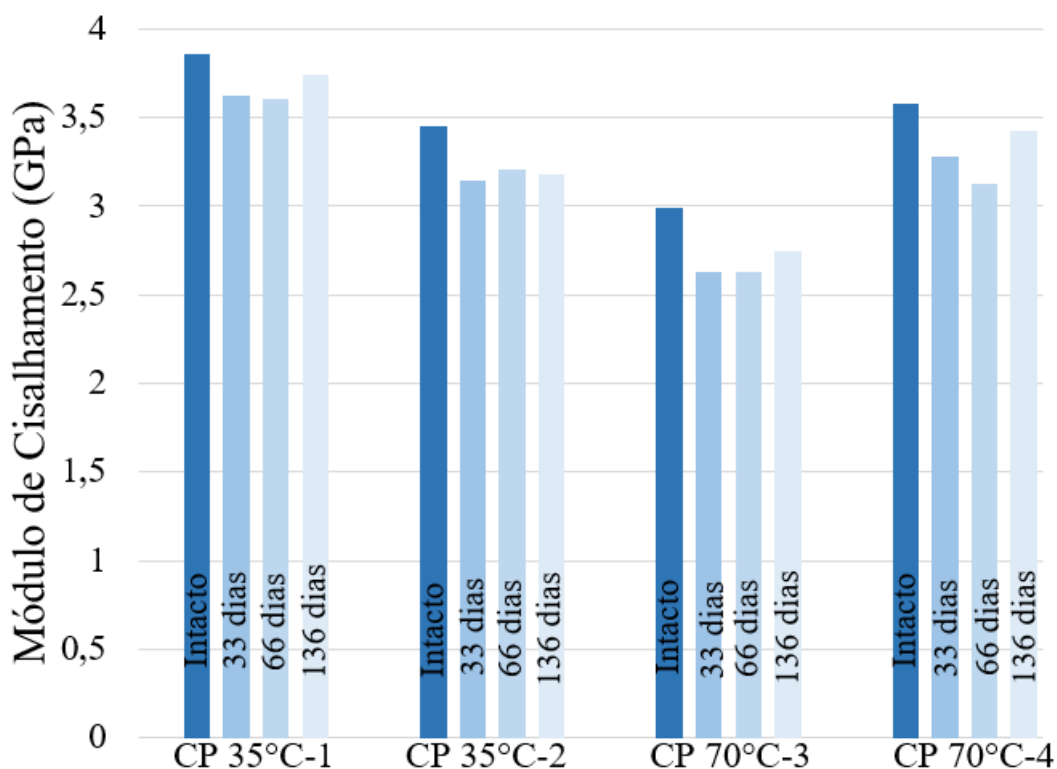
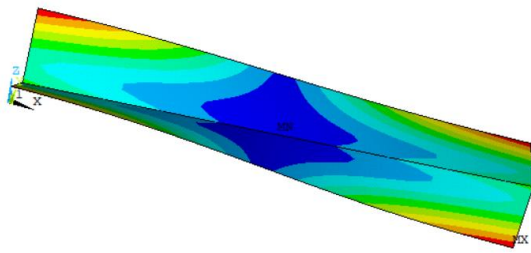


Figura 35. Variação do módulo de cisalhamento ao longo do envelhecimento

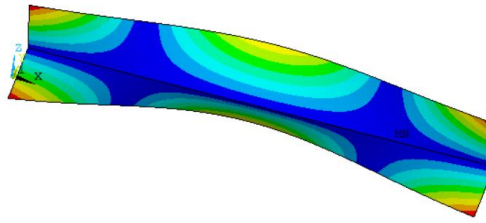
4.4. Resultados do modelo numérico

Através do modelo numérico discretizado configurado com as propriedades da Tabela 4, pôde-se fazer o processamento para obtenção dos modos de vibração e suas respectivas frequências. Como resultado, foram obtidas três frequências de corpo rígido, uma vez que se trata de uma configuração livre-livre. Os modos de flexão e torcionais excluindo os três primeiros de translação podem ser vistos na Figura 36.

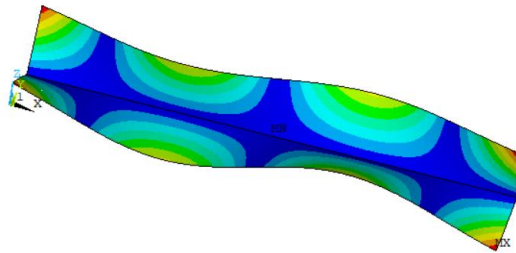
Ao contrário de elementos cujas seções são duplamente simétricas, os modos encontrados se mostraram mais complexos, tendo em seu comportamento aspectos predominantes de torção e flexão das abas. Através desses resultados preliminares, é observada faixa de frequências dos modos indo até cerca de 800 Hz para os 15 primeiros modos. Além disso, é possível observar a forma modal e comportamento dos autovetores para escolher o lugar ideal do acelerômetro, onde capte grande parte dos modos e que não impacte na massa modal.



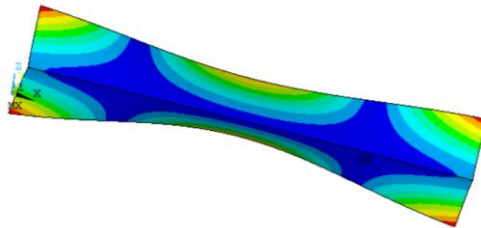
1) 59,87 Hz



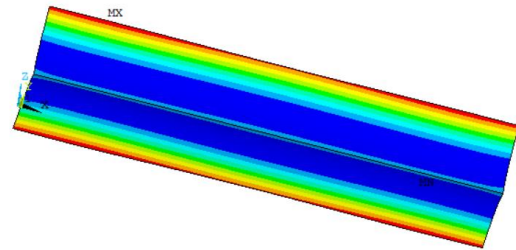
2) 106,60 Hz



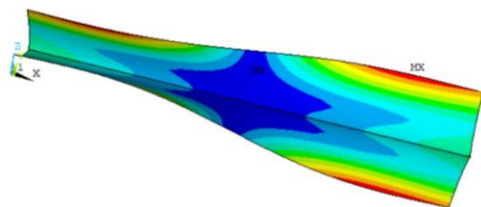
3) 188,41 Hz



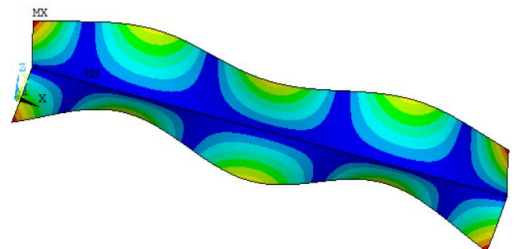
4) 238,54 Hz



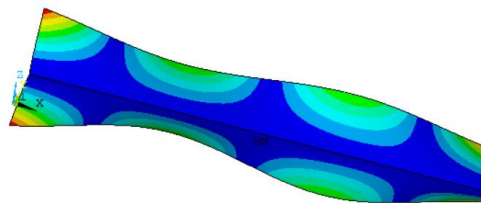
5) 264,86 Hz



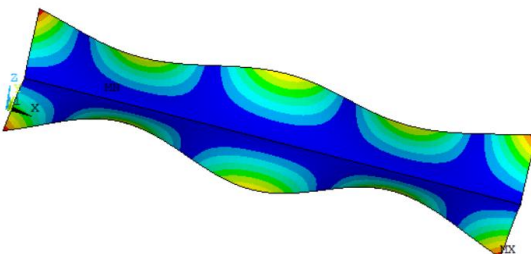
6) 241,32 Hz



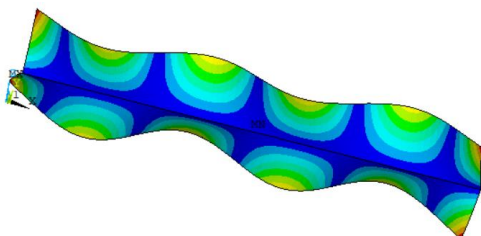
7) 300,17 Hz



8) 303,03 Hz



9) 389,34 Hz



10) 447,03 Hz

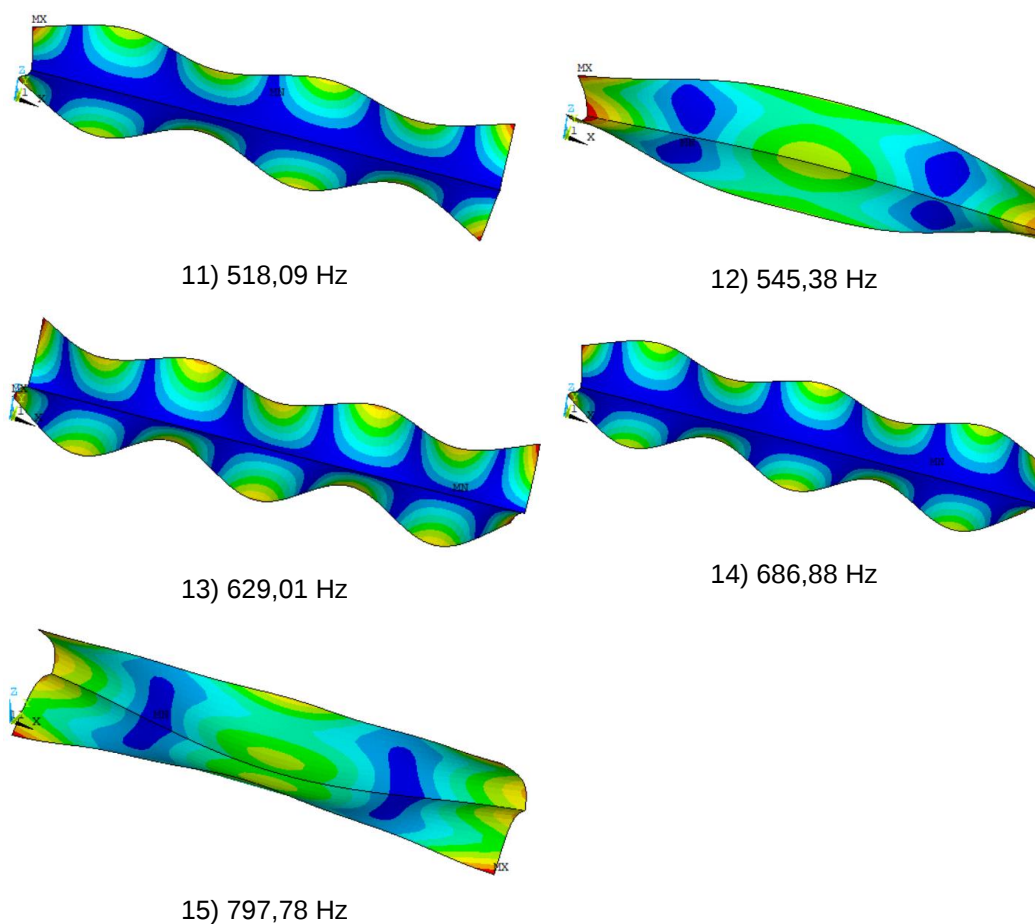


Figura 36. Modos de vibração numéricos

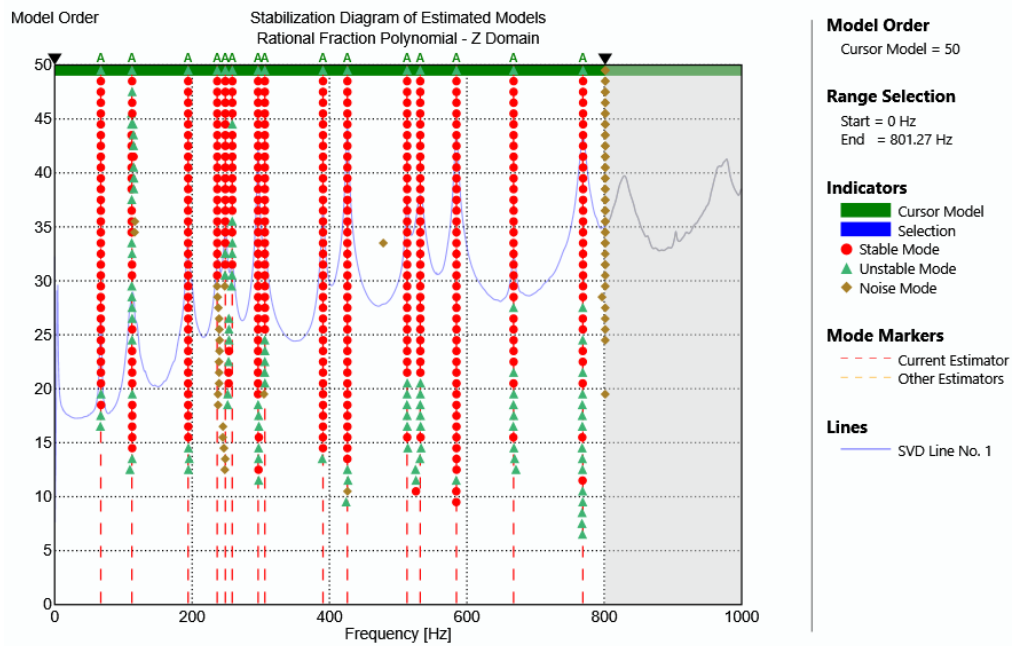
4.5. Resultados obtidos na análise modal experimental

Com o setup montado e o perfil instrumentado, o ensaio de vibração livre pôde ser feito. Inicialmente, realizou-se um teste para avaliar o impacto da rigidez dos elásticos para a configuração livre-livre da cantoneira. Compararam-se então os resultados para o perfil 2-70°C intacto com um elástico em cada extremidade e dois elásticos em cada extremidade (Figura 37).

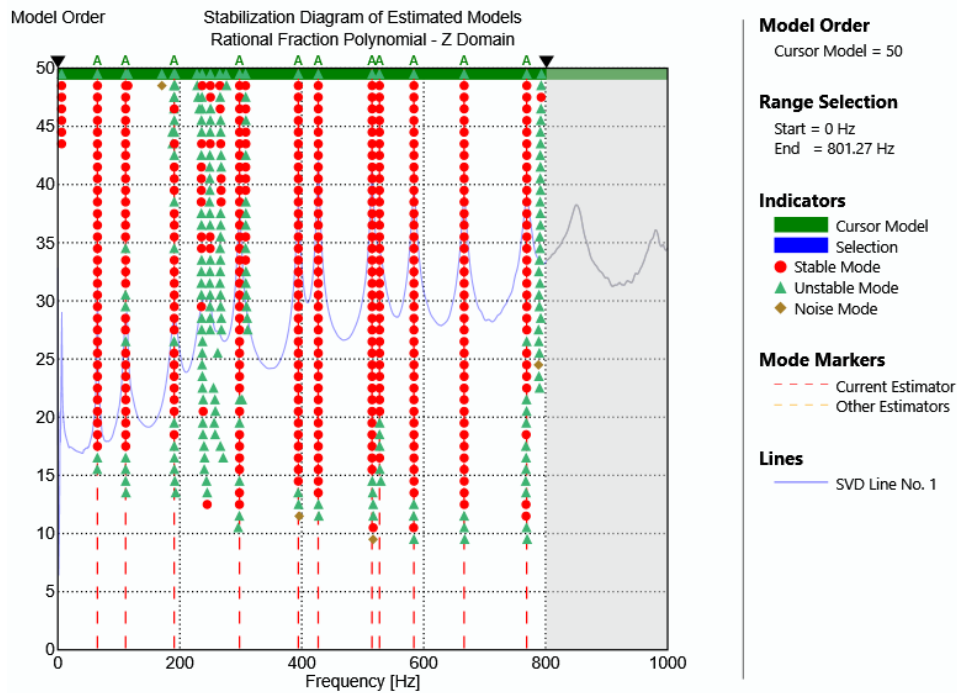


Figura 37. Utilização de dois elásticos na extremidade do perfil

Como visto na Figura 38 e na Tabela 7, a comparação mostrou que o aumento de rigidez no apoio, caracterizado pelo acréscimo de mais dois elásticos, apresentou um resultado semelhante ao ensaio com apenas dois elementos, sendo a diferença percentual entre frequências muito baixa, principalmente para modos mais elevados. Também foi evidenciado que o ensaio com menos rigidez conseguiu captar melhor todos os modos com base nos mesmos parâmetros, uma vez que alguns modos não foram observados na Tabela 7. Já na verificação dos indicadores obtidos pelo RFP-Z, observou-se uma maior estabilidade ao usar apenas um elástico, evidenciado através dos triângulos verdes na Figura 38b comparado com os círculos vermelhos na Figura 38a. Essa diferença pode ser ajustada através do aumento da ordem do modelo dentro do ARTeMIS, no qual foi definida em 50, visando encontrar pontos mais estáveis. Dessa forma, optou-se em utilizar apenas um elástico em cada extremidade por reproduzir um apoio com menos rigidez, se aproximando mais de uma situação livre-livre e sendo mais fácil de reproduzir.



a)



b)

Figura 38. Diagrama de estabilização das funções de resposta em frequência para o a) ensaio com um elástico em cada extremidade e b) dois elásticos em cada extremidade

Tabela 7. Comparação entre modos de vibração e suas frequências para diferentes rigidezes do apoio

Modo	Frequências com Dois elásticos nas extremidades (Hz)	Frequências com Quatro elásticos nas extremidades (Hz)	Diferença percentual
1	67,11	64,87	-3,34%
2	112,39	111,06	-1,18%
3	194,20	190,78	-1,76%
4	236,62	-	-
5	248,32	-	-
6	258,47	-	-
7	296,04	297,89	0,62%
8	305,90	-	-
9	390,51	394,30	0,97%
10	426,03	427,02	0,23%
11	513,01	515,20	0,43%
12	532,16	527,54	-0,87%
13	584,81	583,87	-0,16%
14	667,95	666,30	-0,25%
15	768,96	768,84	-0,016%

Segundo Avitabile [56], ao se comparar a rigidez do apoio para avaliar seu impacto nos modos flexíveis, altera-se consequentemente os modos de corpo rígido. Quando os modos flexíveis se alteram muito pouco, contudo, isso significa que existe uma baixa influência da condição de apoio e da frequência de corpo rígido em um determinado modo. Como visto na Tabela 7, esse comportamento foi observado principalmente nos modos mais elevados (do 9º até o 15º modo), onde a diferença percentual entre os ensaios com um e com dois elásticos em cada extremidade ficou cada vez menor e os resultados podem então ser usados com mais segurança, sendo mais representativos da condição livre-livre.

Em seguida, realizou-se o ensaio com o perfil 1-35°C intacto para comparar com o 2-70°C e com o modelo numérico. Os dois ensaios de vibração livre apresentaram resultados muito semelhantes, uma vez que os espécimes foram retirados do mesmo perfil estrutural (Figura 18). A variabilidade dos resultados, apesar de pequena, pode ser influência da

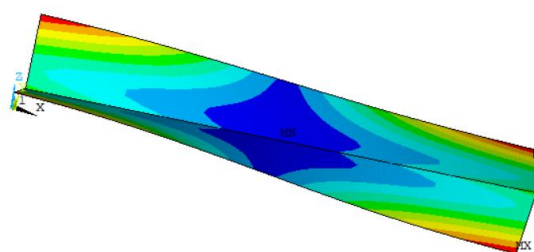
heterogeneidade da massa específica como visto no ensaio do SONELASTIC, assim como a variação da espessura do perfil.

Na comparação dos resultados experimentais íntegros com o numérico, também visto na Figura 39, foi observada boa correlação no comportamento dinâmico mesmo não realizando nenhum tipo de calibração. Ao se calcular o erro médio das frequências naturais, definido como “MAPE” (*Mean absolute percentage error*), através da equação (24), entre o modelo em MEF e o perfil 1-35°C é observado uma diferença de 4,11% enquanto para o perfil 2-70°C foi de 4,35%. Esses valores mostram que a análise computacional conseguiu estimar de forma razoável tanto os modos como as frequências, comprovando a importância desta etapa na análise dinâmica experimental, seja para embasar o procedimento experimental ou para obter valores como parâmetros dinâmicos iniciais para a estrutura intacta.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^{n=15} \left| \frac{f_i^{num} - f_i^{exp}}{f_i^{exp}} \right| \quad (24)$$

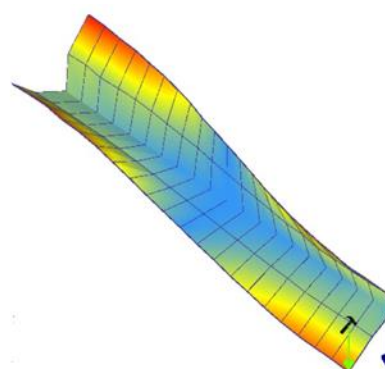
Onde n é o número de modos, f_i^{exp} é a frequência experimental e f_i^{num} é a frequência numérica.

Modelo numérico



1) 59,87 Hz

Resultado experimental

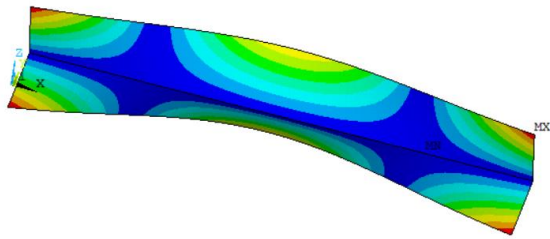


1-35°C: 66,78 Hz

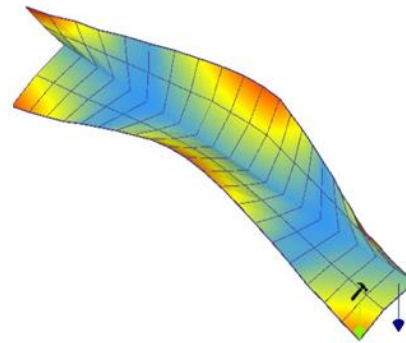
Diferença: -10,35%

2-70°C: 67,11 Hz

Diferença: -10,79%



2) 106,60 Hz

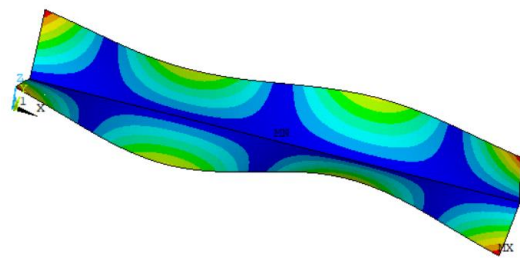


1-35°C: 114,45 Hz

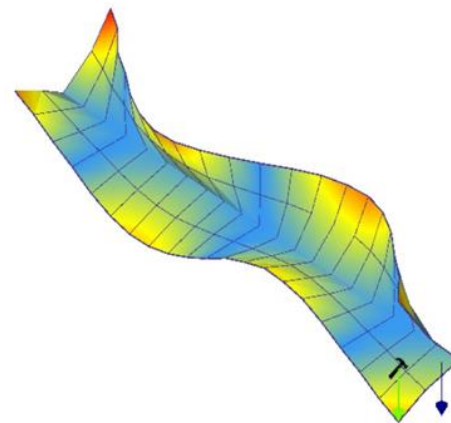
Diferença: -6,86%

2-70°C: 112,39 Hz

Diferença: -5,15%



3) 188,41 Hz

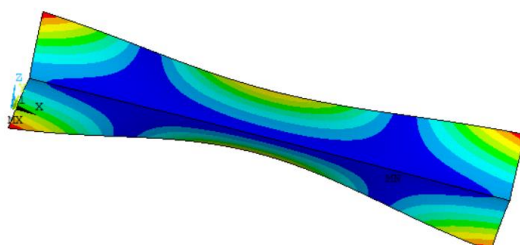


1-35°C: 193,52 Hz

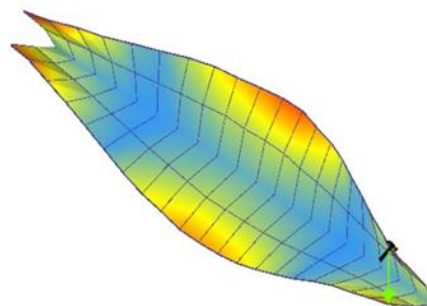
Diferença: -2,64%

2-70°C: 194,20 Hz

Diferença: -2,98%



4) 238,54 Hz

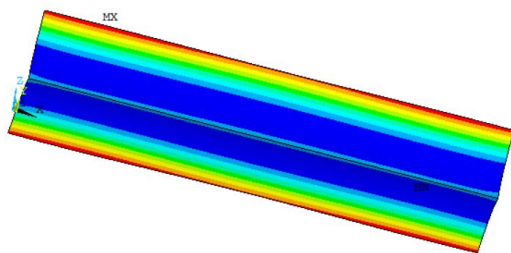


1-35°C: 235,56Hz

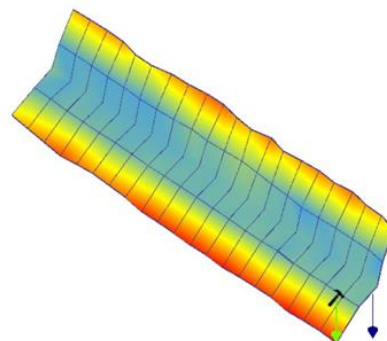
Diferença: 1,27%

2-70°C: 236,62 Hz

Diferença: 0,81%



5) 264,86 Hz

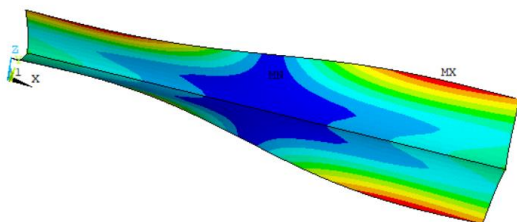


1-35°C: 251,76 Hz

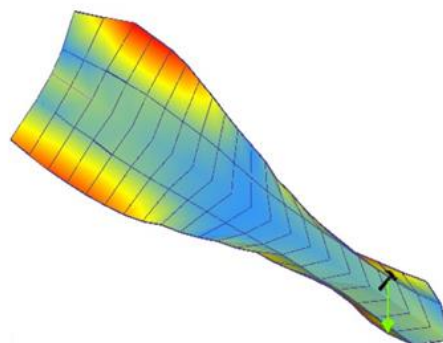
Diferença: 5,20%

2-70°C: 248,32 Hz

Diferença: 6,66%



6) 241,32 Hz

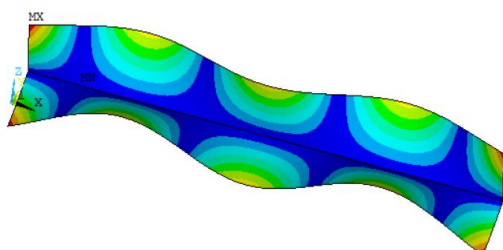


1-35°C: 263,72 Hz

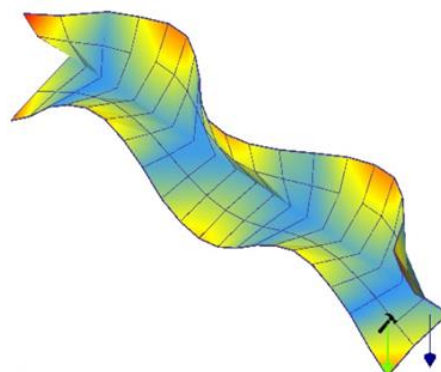
Diferença: -8,50%

2-70°C: 258,47 Hz

Diferença: -6,64%



7) 300,17 Hz

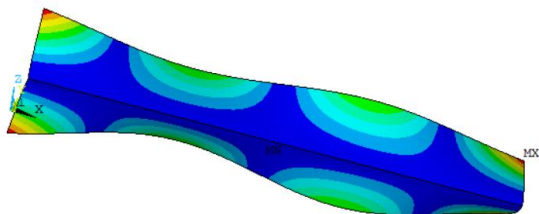


1-35°C: 297,70 Hz

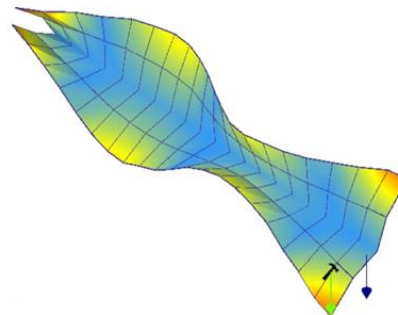
Diferença: -0,83%

2-70°C: 296,04 Hz

Diferença: -1,40%



8) 303,03 Hz

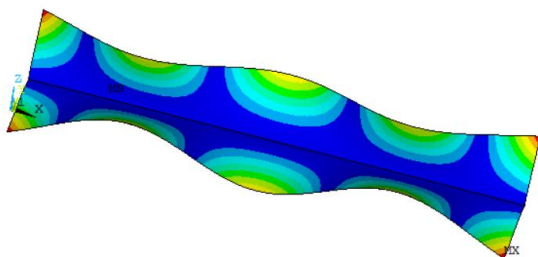


1-35°C: 309,9 Hz

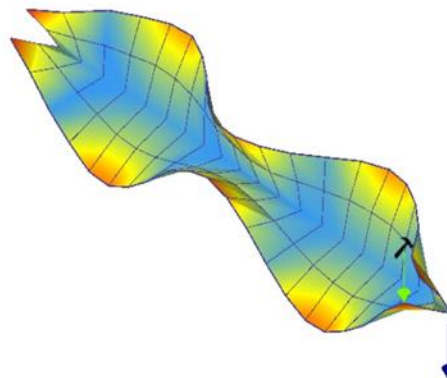
Diferença: -2,21%

2-70°C: 305,90 Hz

Diferença: -0,94%



9) 389,34 Hz

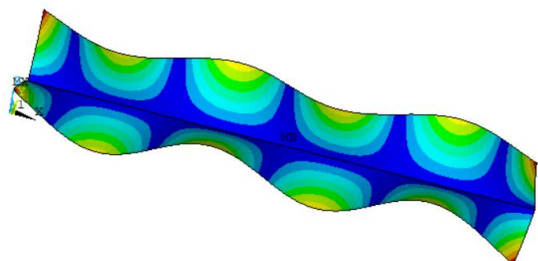


1-35°C: 394,23 Hz

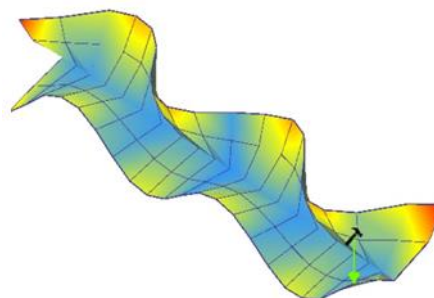
Diferença: -1,24%

2-70°C: 390,51 Hz

Diferença: -0,30%



10) 447,03 Hz

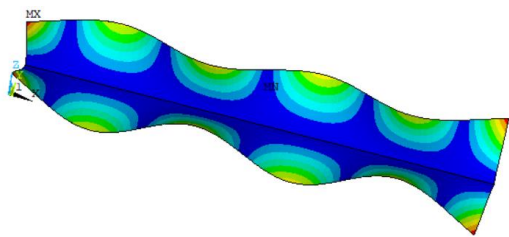


1-35°C: 426,95 Hz

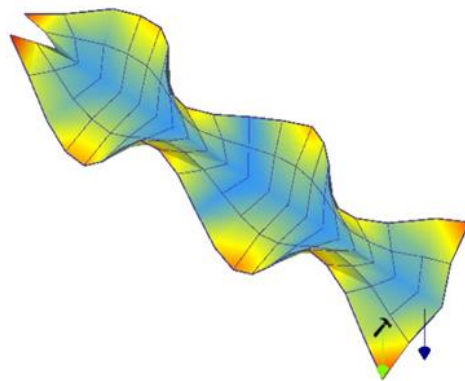
Diferença: 4,70%

2-70°C: 426,03 Hz

Diferença: 4,93%



11) 518,09 Hz

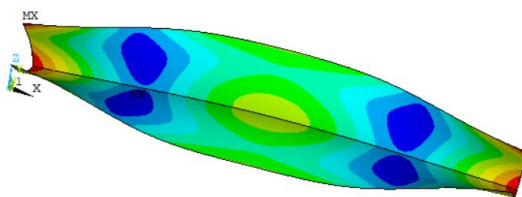


1-35°C: 515,41Hz

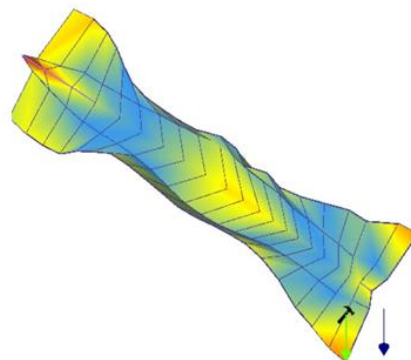
Diferença: 0,52%

2-70°C: 513,01 Hz

Diferença: 0,99%



12) 545,38 Hz

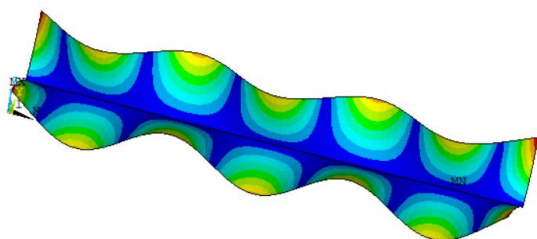


1-35°C: 529,84 Hz

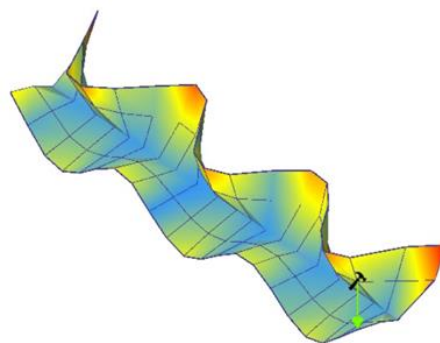
Diferença: 2,93%

2-70°C: 532,16 Hz

Diferença: 2,48%



13) 629,01 Hz



1-35°C: 583,21 Hz

Diferença: 7,85%

2-70°C: 548,81 Hz

Diferença: 14,61%

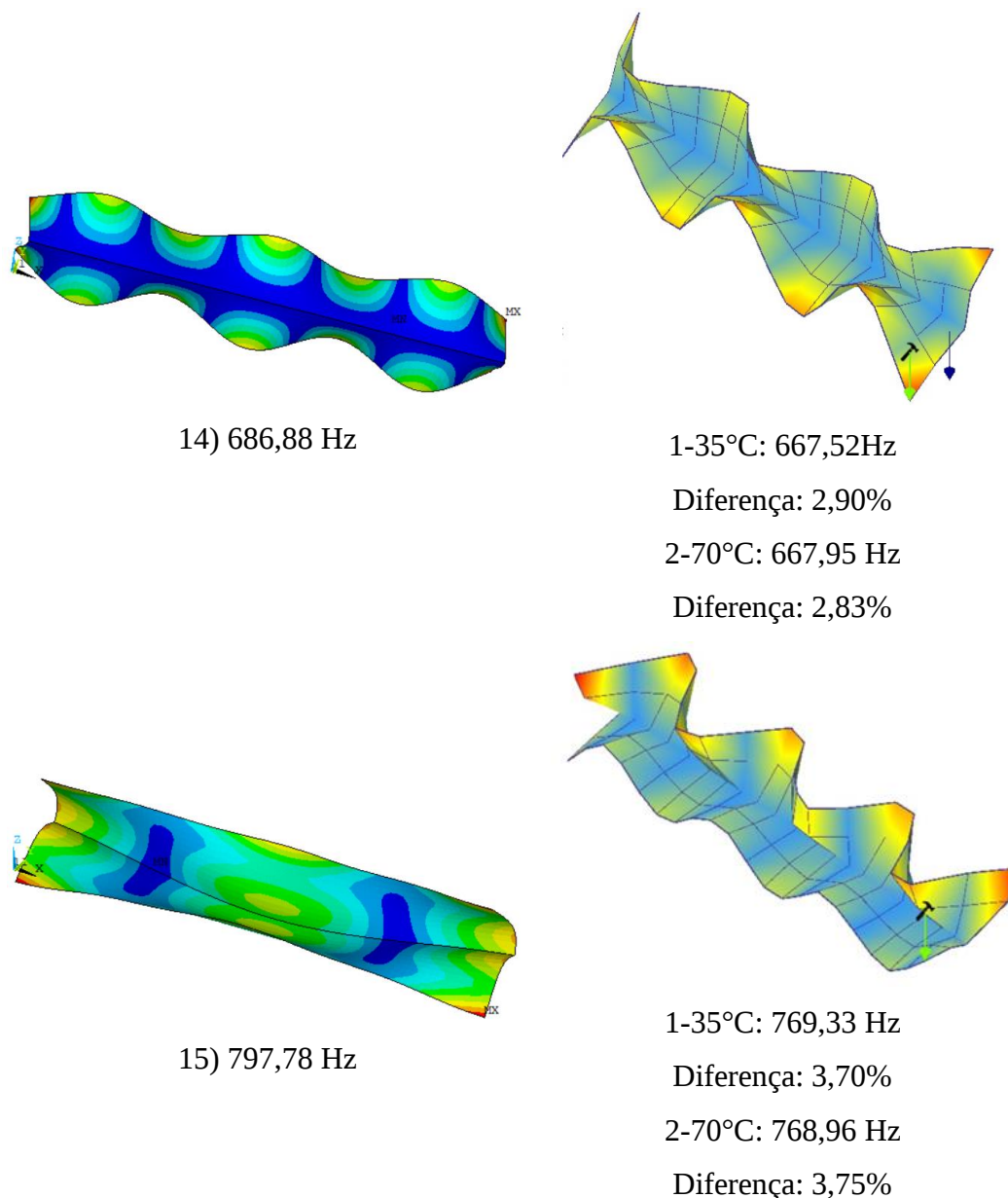


Figura 39. Comparação entre modos e frequências numéricas com experimentais para os perfis 1-35°C e 2-70°C intactos

Ao analisar os efeitos do envelhecimento no perfil 1-35°C através de ensaios dinâmicos, observou-se pouca mudança no comportamento dinâmico do espécime (Figura 40, Figura 41 e Tabela 8). Houve, no entanto, uma redução das frequências em quase todos os modos para os 33 dias, 66 dias e 136 dias de envelhecimento, confirmando a perda de rigidez ilustrada no SONELASTIC (Figura 34 e Figura 35). Assim como os valores de módulo de elasticidade e de cisalhamento aos 33 dias, observada via ensaio sonoro, há uma queda nas frequências de vibração, representada pelo deslocamento do gráfico para a esquerda (curva vermelha do gráfico

da Figura 40). Aos 66 e 136 dias, existe um comportamento mais constante, onde parte da rigidez foi levemente restaurada, indicando a possibilidade da influência do efeito de pós cura.

Durante o envelhecimento, diversos fenômenos ocorrem no material simultaneamente como a perda de rigidez e massa ocasionada pela hidrólise, dilatação volumétrica, criação de fissuras e plastificação e aumento de rigidez associado ao efeito pós cura. No geral, apesar de existir um aumento de rigidez evidenciado principalmente após os 33 dias, ele não foi suficiente para restaurar completamente nem para aumentar as propriedades originais do material, mostrando que a degradação pôde ser observada através deste ensaio dinâmico, apesar da maior variação de frequências ser de 2,44% em relação ao perfil original e um MAPE de 1,32%.

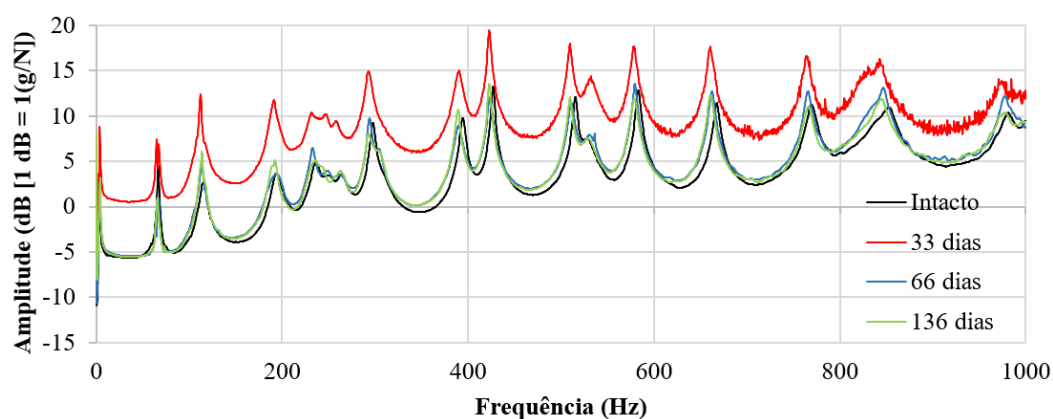


Figura 40. Função de resposta em frequência para o perfil 1-35°C intacto e envelhecido

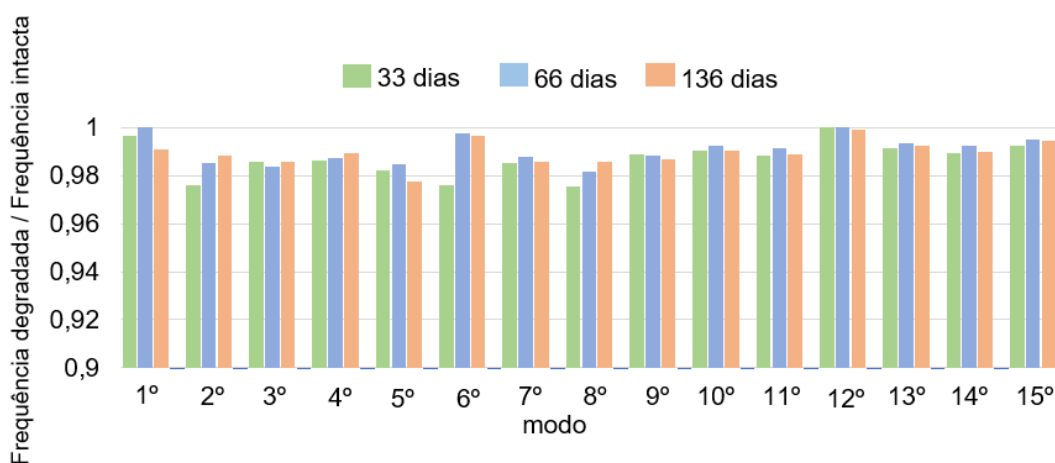


Figura 41. Normalização das frequências de vibração para o perfil 1-35°C

Tabela 8. Variação das frequências e suas diferenças percentuais em relação ao perfil intacto para envelhecimento de 33,66 e 136 dias para o perfil 1-35°C

Modo	Intacto	33 dias	66 dias	136 dias
1	66,78 Hz	66,56 Hz -0,33%	66,84 Hz 0,09%	66,19 Hz -0,88%
2	114,45 Hz	111,68 Hz -2,42%	112,79 Hz -1,45%	113,15 Hz -1,14%
3	193,52 Hz	190,82 Hz -1,40%	190,40 Hz -1,61%	190,79 Hz -1,41%
4	235,56 Hz	232,40 Hz -1,34%	232,56 Hz -1,27%	233,11 Hz -1,04%
5	251,76 Hz	247,24 Hz -1,80%	247,93 Hz -1,52%	246,14 Hz -2,23%
6	263,72 Hz	257,47 Hz -2,37%	263,10 Hz -0,24%	262,80 Hz -0,35%
7	297,70 Hz	293,26 Hz -1,49%	294,04 Hz -1,23%	293,45 Hz -1,43%
8	309,9 Hz	302,35 Hz -2,44%	304,20 Hz -1,84%	305,43 Hz -1,44%
9	394,23 Hz	389,89 Hz -1,10%	389,73 Hz -1,14%	388,98 Hz -1,33%
10	426,95 Hz	422,93 Hz -0,94%	423,71 Hz -0,76%	422,96 Hz -0,93%
11	515,41 Hz	509,51 Hz -1,14%	510,96 Hz -0,86%	509,67 Hz -1,11%
12	529,84 Hz	532,19 Hz 0,44%	531,44 Hz 0,30%	529,37 Hz -0,09%
13	583,21 Hz	578,34 Hz -0,84%	579,47 Hz -0,64%	578,75 Hz -0,76%
14	667,52 Hz	660,50 Hz -1,05%	662,40 Hz -0,77%	660,89 Hz -0,99%
15	769,33 Hz	763,67 Hz -0,74%	765,63 Hz -0,48%	765,10 Hz -0,55%

Já para o perfil 2-70°C, houve uma variação mais evidente das frequências de vibração a partir dos 33 dias de envelhecimento (Figura 42, Figura 43 e Tabela 9). Na primeira retirada da câmara, houve reduções de até 8,08% nas frequências e um MAPE de 3,9% mostrando o impacto significativo nesta propriedade dinâmica e alteração nas propriedades elásticas do material assim como evidenciado também no ensaio do SONELASTIC (Figura 34 e Figura 35). Entre os 66 dias e 136 dias também

é observada a restauração das propriedades dinâmicas como visto anteriormente, até um MAPE de 1,81%. A restauração mais acentuada pode ser gerada pelo maior efeito de pós cura onde a câmara possuía temperatura mais próxima da Tg da resina.

Comparando o MAPE para os 7 primeiros modos obtidos para o perfil 1-35°C e 2-70°C, foi encontrado um valor de 1,59% e 4,96% respectivamente. Já para os 8 últimos modos, uma variação de 1,09% e 2,97% foi encontrada, mostrando que os primeiros modos ilustrados na Figura 39 foram mais impactados pela perda de rigidez do compósito.

Analisando a influência da variação da massa, através da absorção, na modificação das frequências de vibração, considerando que na vizinhança de cada ressonância a contribuição dos demais modos é nula e equivalente a um sistema de um grau de liberdade (método da amplitude de pico – denominado peak-picking method na literatura inglesa [57] – tem-se que assumindo que a rigidez se mantivesse intacta, a variação nas frequências pela absorção de 3,25% de água (pior CP aos 70°C) impactaria 1,6% no valor das frequências. Como, no geral, as alterações vistas na Tabela 9 são superiores em relação a este valor, é possível relacionar as variações encontradas com a perda de rigidez. De forma análoga, aos 35°C a absorção de cerca de 2% impactaria até 1,0% nas frequências de vibração, evidenciando também que houve redução na rigidez do material.

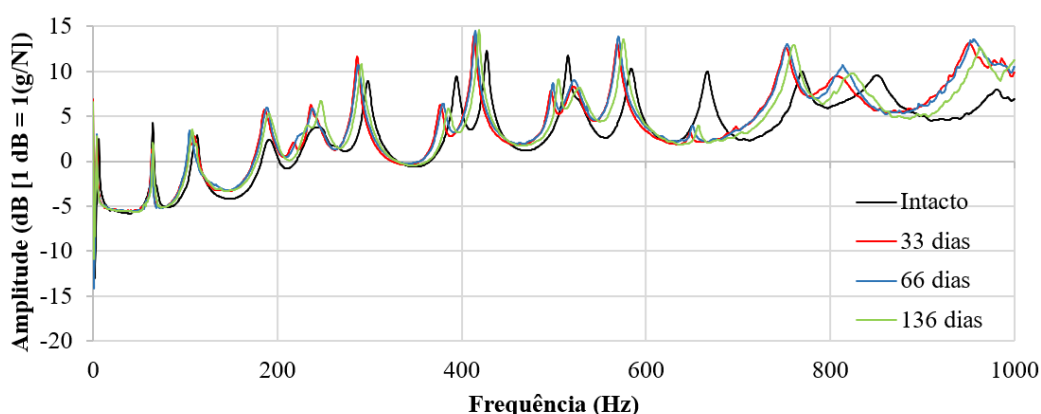


Figura 42. Função de resposta em frequência para o perfil 2-70°C intacto e envelhecido

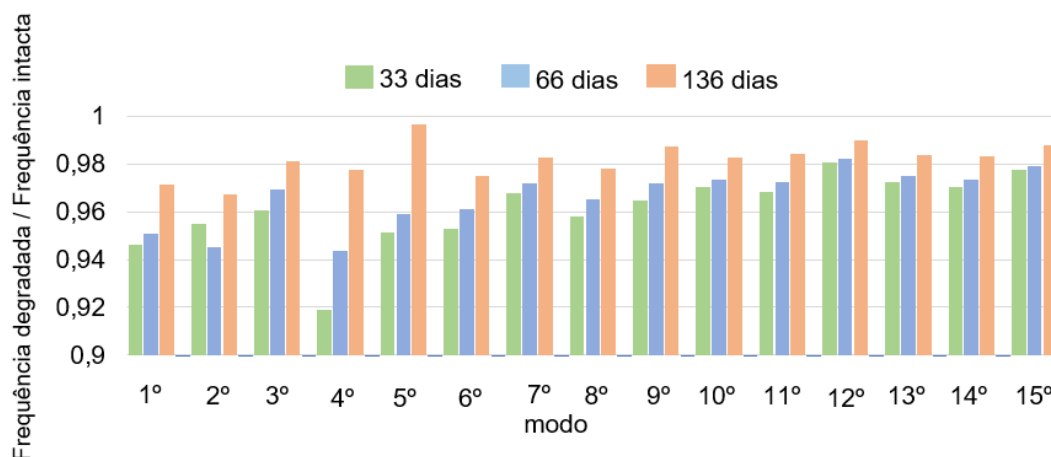


Figura 43. Normalização das frequências de vibração para o perfil 2-70°C

Tabela 9. Variação das frequências e suas diferenças percentuais em relação ao perfil intacto para envelhecimento de 33,66 e 136 dias para o perfil 2-70°C

Modo	Intacto	33 dias	66 dias	136 dias
1	67,11 Hz	63,50 Hz -5,38%	63,82 Hz -4,90%	65,19 Hz -2,86%
2	112,39 Hz	107,30 Hz -4,53%	106,22 Hz -5,49%	108,73 Hz -3,26%
3	194,20 Hz	186,54 Hz -3,94%	188,23 Hz -3,07%	190,55 Hz -1,88%
4	236,62 Hz	217,50 Hz -8,08%	223,25 Hz -5,65%	231,28 Hz -2,26%
5	248,32 Hz	236,27 Hz -4,85%	238,21 Hz -4,07%	247,43 Hz -0,36%
6	258,47 Hz	246,30 Hz -4,71%	248,38 Hz -3,90%	251,97 Hz -2,51%
7	296,04 Hz	286,52 Hz -3,22%	287,66 Hz -2,38%	290,98 Hz -1,71%
8	305,90 Hz	292,99 Hz -4,22%	295,28 Hz -3,47%	299,14 Hz -2,21%
9	390,51 Hz	376,65 Hz -3,55%	379,46 Hz -2,83%	385,48 Hz -1,29%
10	426,03 Hz	413,37 Hz -2,97%	414,82 Hz -2,63%	418,68 Hz -1,73%
11	513,01 Hz	496,64 Hz -3,19%	498,76 Hz -2,78%	504,91 Hz -1,58%
12	532,16 Hz	521,93 Hz -1,92%	522,57 Hz -1,80%	526,88 Hz -0,99%
13	584,81 Hz	568,79 Hz -2,74%	570,23 Hz -2,49%	575,39 Hz -1,61%
14	667,95 Hz	648,26 Hz -2,95%	650,36 Hz -2,63%	656,67 Hz -1,69%
15	768,96 Hz	751,64 Hz -2,25%	752,78 Hz -2,10%	759,68 Hz -1,21%

Em relação à taxa de amortecimento, é possível observar uma variabilidade nos resultados obtidos para os perfis estudados. No Perfil 1-35°C, é observado através da Figura 44 e Tabela 10 tanto um aumento como uma redução deste parâmetro dinâmico ao longo do envelhecimento. Apesar disso, cerca de 65% dos resultados mostraram uma redução do amortecimento em relação ao valor do CP intacto.

Já Para o perfil 2-70°C, um comportamento mais claro é observado na Figura 45 e Tabela 11, onde é visto o aumento do amortecimento principalmente entre o 4° e o 9° modo. Além disso, é visto de forma geral que houve um aumento do amortecimento nas primeiras retiradas, sendo que nas retiradas seguintes foram evidenciadas quedas em seus valores. Esse resultado pode ser embasado pelo fato de que uma degradação gera um aumento da taxa de amortecimento, principalmente por causa da degradação e geração de fissuras na interface entre matriz e fibra, além da plastificação do polímero [15,58]. Após essa etapa (retirada aos 33 dias) o efeito pós-cura se mostrou mais relevante, reduzindo novamente este parâmetro. Esses resultados seguem a mesma linha dos encontrados na análise do módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e das frequências de vibração.

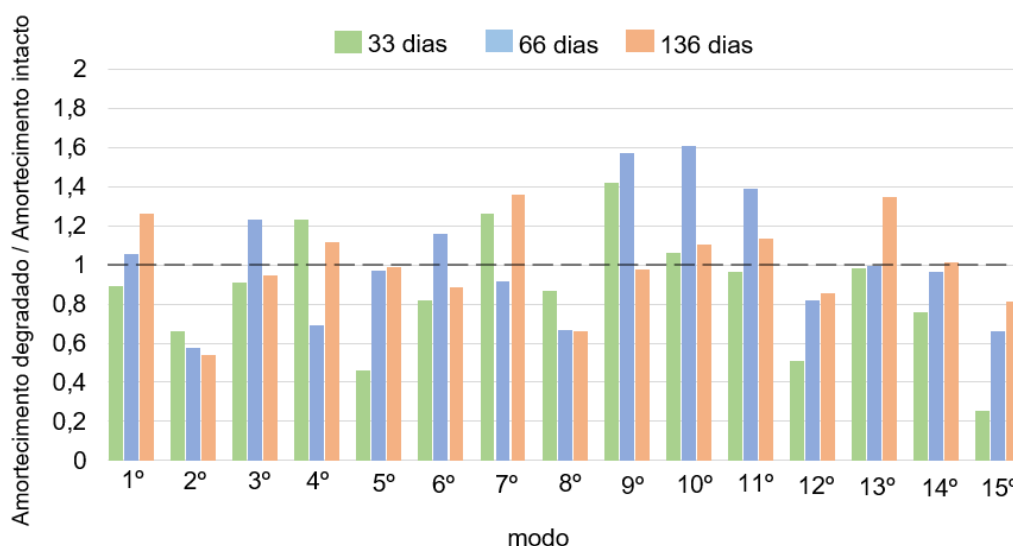


Figura 44. Normalização da variação do amortecimento para os 15 primeiros modos do perfil 1-35°C

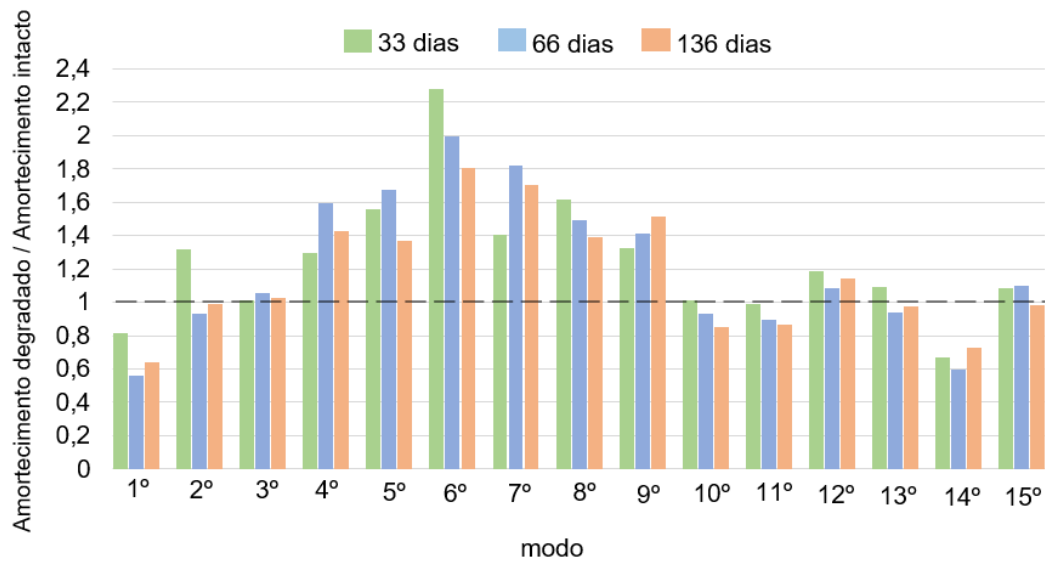


Figura 45. Normalização da variação do amortecimento para os 15 primeiros modos do perfil 2-70°C

Tabela 10. Taxa de amortecimento e suas diferenças percentuais em relação ao perfil íntegro para o perfil 1-35°C intacto e envelhecido

Modo	Intacto	33 dias	66 dias	136 dias
1	0,946%	0,845%	0,999%	1,195%
	Diferença:	-10,68%	5,60%	26,32%
2	2,898%	1,910%	1,674%	1,570%
	Diferença:	-34,09%	-42,24%	-45,82%
3	1,949%	1,772%	2,403%	1,841%
	Diferença:	-9,08%	23,29%	-5,54%
4	2,076%	2,561%	1,432%	2,319%
	Diferença:	23,36%	-31,02%	11,71%
5	1,984%	0,916%	1,930%	1,960%
	Diferença:	-53,83%	-2,72%	-1,21%
6	2,301%	1,881%	2,671%	2,042%
	Diferença:	-18,25%	16,08%	-11,26%
7	0,766%	0,966%	0,701%	1,042%
	Diferença:	26,11%	-8,49%	36,03%
8	1,882%	1,629%	1,254%	1,239%
	Diferença:	-13,44%	-33,37%	-34,17%
9	0,590%	0,837%	0,928%	0,576%
	Diferença:	41,86%	57,29%	-2,37%
10	0,310%	0,329%	0,499%	0,343%
	Diferença:	6,13%	60,97%	10,65%
11	0,357%	0,344%	0,496%	0,406%
	Diferença:	-3,64%	38,94%	13,73%
12	1,340%	0,680%	1,098%	1,142%
	Diferença:	-49,25%	-18,06%	-14,78%
13	0,339%	0,334%	0,337%	0,457%
	Diferença:	-1,47%	-0,59%	34,81%
14	0,389%	0,294%	0,375%	0,393%
	Diferença:	-24,42%	-3,60%	1,03%
15	0,664%	0,170%	0,437%	0,540%
	Diferença:	-74,40%	-34,19%	-18,67%
	Média das diferenças	-13,01%	1,86%	0,03%

Tabela 11. Taxa de amortecimento e suas diferenças percentuais em relação ao perfil íntegro para o perfil 2-70°C intacto e envelhecido

Modo	Intacto	33 dias	66 dias	136 dias
1	1,326%	1,083%	0,746%	0,852%
	Diferença:	-18,33%	-43,74%	-35,75%
2	2,690%	3,541%	2,497%	2,663%
	Diferença:	31,64%	-7,17%	-1,00%
3	1,836%	1,859%	1,942%	1,880%
	Diferença:	1,25%	5,77%	2,40%
4	1,623%	2,099%	2,583%	2,317%
	Diferença:	29,33%	59,15%	42,76%
5	0,894%	1,390%	1,499%	1,221%
	Diferença:	55,48%	67,67%	36,58%
6	1,161%	2,649%	2,314%	2,096%
	Diferença:	128,17%	99,31%	80,53%
7	0,409%	0,576%	0,745%	0,696%
	Diferença:	40,83%	82,15%	70,17%
8	0,991%	1,602%	1,480%	1,377%
	Diferença:	61,65%	49,34%	38,95%
9	0,594%	0,785%	0,840%	0,900%
	Diferença:	32,15%	41,41%	51,52%
10	0,363%	0,367%	0,338%	0,310%
	Diferença:	1,10%	-6,89%	-14,60%
11	0,449%	0,443%	0,401%	0,390%
	Diferença:	-1,34%	-10,69%	-13,14%
12	1,014%	1,203%	1,098%	1,160%
	Diferença:	18,64	8,28%	-14,40%
13	0,389%	0,426%	0,366%	0,379%
	Diferença:	9,51%	-5,91%	-2,57%
14	0,425%	0,286%	0,252%	0,309%
	Diferença:	-32,71%	-40,71%	-27,29%
15	0,669%	0,724%	0,735%	0,659%
	Diferença:	-8,22%	-9,87%	-1,49%
	Média das diferenças	24,37%	20,52%	16,10%

5. CONCLUSÃO

Este trabalho, por meio da análise modal experimental, visou avaliar a degradação em perfis pultrudados de PRFV submetidos ao envelhecimento em temperatura, salinidade e umidade elevada. Para isso, foi utilizada a configuração livre-livre para as vigas no ensaio de vibração livre, onde o método de única entrada e única saída (single-input, single-output) foi adotado utilizando um martelo dinâmico instrumentado e um acelerômetro.

A fim de caracterizar o material, corpos de prova foram feitos para a utilização do ensaio de caracterização por impulso através da resposta sonora. No estudo de absorção desses espécimes, foi observado que a temperatura elevada aumenta a absorção de água, ou seja, faz com que o material atinja a saturação mais rápido. Essa característica foi evidenciada, uma vez que CPs com mesma massa específica, mas colocados em câmaras diferentes (35°C e 70°C), atingiram o mesmo nível de saturação mas em tempos diferentes. Além disso, os espécimes com menor massa específica absorveram maior quantidade de umidade, uma vez que possuíam menos volume de fibra e possível maior quantidade de vazios em sua estrutura. Por último, houve uma queda acentuada de massa após a saturação nos elementos da câmara de 70°C, podendo ser justificada pela hidrólise da matriz.

A obtenção dos modos de elasticidade à flexão e de cisalhamento desses espécimes apresentaram inicialmente uma redução de rigidez. Nas retiradas seguintes foram observadas tanto reduções como aumento dessas propriedades. As reduções contínuas são explicadas pelos efeitos de degradação como dilatação volumétrica, criação e aumento de fissuras, plastificação e hidrólise. Já o aumento é justificado principalmente pelo efeito pós cura onde ligações do polímero que não foram realizadas durante a pultrusão, são feitas posteriormente. Vale destacar que esses fenômenos ocorrem simultaneamente e, dependendo da temperatura, umidade absorvida e tempo de exposição, podem ser dominantes sobre o outro. Apesar disso, nenhum ensaio evidenciou uma rigidez maior que o ensaio controle.

Já na caracterização por impulso através da resposta em frequência, inicialmente foi estudado a influência dos elásticos para a caracterização da condição livre-livre. Comparando os resultados, a utilização de um elástico em cada extremidade da viga foi adotada como padrão pela simplicidade e semelhança com um elemento livre no espaço, obtendo os modos de forma mais precisa, sem a influência de possíveis restrições do apoio.

As frequências e modos obtidos para os dois perfis estudados foram comparados com um modelo numérico em elementos finitos onde foi observada boa correlação entre ambos no que diz respeito às suas formas modais e frequências naturais. Os erros médios contabilizando ao todo 15 frequências naturais de vibração, variando de 67 Hz a 769 Hz, definido como “MAPE” (Mean absolute percentage error) foram de 4,11% e 4,35% em relação a um modelo utilizando as propriedades elásticas obtidas experimentalmente por outro autor. Dessa forma, foi comprovado a semelhança da condição livre-livre através de elásticos.

Em relação à variação das frequências ao longo do envelhecimento, foi observada de maneira geral a redução desta propriedade dinâmica para os perfis da câmara de 35°C e 70°C. A câmara mais branda, apresentou variações menores, chegando a um MAPE de 1,32% e maior variação de 2,44% em relação ao perfil original. Assim como as propriedades elásticas, após a primeira retirada, foi observado o aumento das frequências, mas isso não foi o suficiente para atingir as propriedades iniciais, podendo ser resultado do efeito pós-cura. Na câmara de 70°C variações mais significantes foram obtidas com MAPE de 3,9% e maior variação entre modos de 8,08%. Também foi observado um aumento das frequências após a queda inicial, não sendo essa suficiente para restaurar as frequências controle.

Para a taxa de amortecimento, resultados mais dispersos foram obtidos. Para o espécime aos 35°C há reduções e aumentos do amortecimento, não sendo evidenciado com clareza o impacto da degradação ao longo do envelhecimento. Já para o CP de 70°C, é possível observar o aumento significativo do amortecimento principalmente do 4º ao 9º modo aos 33 dias de envelhecimento, sendo observada uma redução

nesta propriedade nas retiradas seguintes. Esse resultado era esperado uma vez que a câmara mais agressiva gerou maior impacto na integridade do material, aumentando seu amortecimento devido a geração de fissuras, de danos na interface fibra e matriz e plastificação da resina.

Os estudos da variação do módulo de elasticidade à flexão, módulo de cisalhamento, variação das frequências de vibração e da taxa de amortecimento mostraram no geral resultados semelhantes. Aos 33 dias de envelhecimento os ensaios evidenciaram uma redução de rigidez seguida pela restauração das propriedades após esse período até os 136 dias. Apesar disso, o ganho posterior de rigidez não foi suficiente para atingir as propriedades iniciais do material.

Dessa forma, foi evidenciado que a utilização de análises modais experimentais para a avaliação de danos, principalmente oriundos do envelhecimento em perfis pultrudados de PRFV é eficiente, tanto na verificação da variação das frequências quanto no estudo da taxa de amortecimento de forma simples e barata, podendo ser reproduzida em campo como controle de qualidade.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

- Realização do estudo por períodos mais longos, verificando sua influência no material.
- Estudar perfis com seções transversais diversas, assim como diferentes volumes de fibra e tipos de resinas.
- Utilização de ensaios destrutivos para acompanhar a variação das propriedades elásticas e comparar com os obtidos através das técnicas dinâmicas.
- Utilização de ensaios de imagem para avaliar os mecanismos de degradação.
- Utilização de técnicas de otimização e de *model updating* para estimar as propriedades elásticas através da calibração entre o modelo experimental e o modelo numérico.

REFERÊNCIAS

- [1] Vedernikov A, Safonov A, Tucci F, Carlone P, Akhatov I. Pultruded materials and structures: A review. *Journal of Composite Materials* 2020;54:4081–117. <https://doi.org/10.1177/0021998320922894>.
- [2] Gand AK, Chan TM, Mottram JT. Civil and structural engineering applications, recent trends, research and developments on pultruded fiber reinforced polymer closed sections: A review. *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 2013;7:227–44. <https://doi.org/10.1007/s11709-013-0216-8>.
- [3] Minchenkov K, Vedernikov A, Safonov A, Akhatov I. Thermoplastic Pultrusion: A Review 2021. <https://doi.org/10.3390/polym>.
- [4] Bazli M, Ashrafi H, Oskouei AV. Effect of harsh environments on mechanical properties of GFRP pultruded profiles. *Composites Part B: Engineering* 2016;99:203–15. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.019>.
- [5] Liu TQ, Liu X, Feng P. A comprehensive review on mechanical properties of pultruded FRP composites subjected to long-term environmental effects. *Composites Part B: Engineering* 2020;191:107958. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107958>.
- [6] Sousa JM, Correia JR, Gonilha J, Cabral-Fonseca S, Firmo JP, Keller T. Durability of adhesively bonded joints between pultruded GFRP adherends under hygrothermal and natural ageing. *Composites Part B: Engineering* 2019;158:475–88. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.060>.
- [7] Liao K, Schultheisz CR, Hunston DL. Effects of environmental aging on the properties of pultruded GFRP 1999;30:485–93.
- [8] Grammatikos SA, Evernden M, Mitchels J, Zafari B, Mottram JT, Papanicolaou GC. On the response to hygrothermal aging of pultruded FRPs used in the civil engineering sector. *JMADE* 2016;96:283–95. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.026>.

- [9] Seruti CA. Caracterização mecânica e desempenho estrutural de elementos pultrudados. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- [10] Vedernikov A, Safonov A, Tucci F, Carlone P, Akhatov I. Pultruded materials and structures : A review 2020. <https://doi.org/10.1177/0021998320922894>.
- [11] Garrido M, Sousa JM, Correia JR, Cabral-Fonseca S. Prediction of long-term performance and definition of a moisture conversion factor for the durability design of pultruded GFRP profiles under hygrothermal exposure. *Construction and Building Materials* 2022;326:126856. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126856>.
- [12] Selzer R, Friedrich K. Influence of water up-take on interlaminar fracture properties of carbon fibre-reinforced polymer composites 1995;30:334–8.
- [13] Selzer R, Friedrich K. Mechanical properties and failure behaviour of carbon fibre-reinforced polymer composites under the influence of moisture. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 1997;28:595–604. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(96\)00154-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(96)00154-6).
- [14] Zafar A, Bertocco F, Schjødt-Thomsen J, Rauhe JC. Investigation of the long term effects of moisture on carbon fibre and epoxy matrix composites. *Composites Science and Technology* 2012;72:656–66. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.01.010>.
- [15] Li H, Zhang K, Fan X, Cheng H, Xu G, Suo H. Effect of seawater ageing with different temperatures and concentrations on static/dynamic mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering* 2019;173:106910. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106910>.
- [16] Davies P, Rajapakse YDS. *Durability of Composites in a Marine Environment*. Springer; 2014.
- [17] Bazli M, Ashrafi H, Oskouei AV. Effect of harsh environments on mechanical properties of GFRP pultruded profiles. *Composites Part*

- B: Engineering 2016;99:203–15.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.019>.
- [18] D’Antino T, Pisani MA, Poggi C. Effect of the environment on the performance of GFRP reinforcing bars. *Composites Part B: Engineering* 2018;141:123–36.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.037>.
- [19] Sousa J, Correia J, Cabral-Fonseca S, Correia CJ. Durability of Glass Fibre Reinforced Polymer Pultruded Profiles: Comparison Between QUV Accelerated Exposure and Natural Weathering in a Mediterranean Climate. 2013.
- [20] Bazli M, Jafari A, Ashrafi H, Zhao XL, Bai Y, Singh Raman RK. Effects of UV radiation, moisture and elevated temperature on mechanical properties of GFRP pultruded profiles. *Construction and Building Materials* 2020;231.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117137>.
- [21] Bazli M, Jafari A, Ashrafi H, Zhao XL, Bai Y, Singh Raman RK. Effects of UV radiation, moisture and elevated temperature on mechanical properties of GFRP pultruded profiles. *Construction and Building Materials* 2020;231:117137.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117137>.
- [22] Suri C, Perreux D. The effects of mechanical damage in a glass fibre/epoxy composite on the absorption rate. vol. 5. 1995.
- [23] Naceri A. An analysis of moisture diffusion according to Fick’s law and the tensile mechanical behavior of a glass-fabric-reinforced composite. 2009.
- [24] Jiang X, Kolstein H, Bijlaard FSK. Moisture diffusion and hygrothermal aging in pultruded fibre reinforced polymer composites of bridge decks. *Materials and Design* 2012;37:304–12.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.017>.
- [25] Ashcroft IA, Wahab MMA, Crocombe AD, Hughes DJ, Shaw SJ. The effect of environment on the fatigue of bonded composite joints . Part 1 : testing and fractography 2001;32:45–58.
- [26] Rao S. *Vibrações mecânicas*. 4ª edição. Pearson educação; 2009.

- [27] Rodrigues Gaspar CM, Nascimento Beserra JH, Taissum Cardoso DC. Non-destructive mechanical characterisation of thin-walled GFRP beams through dynamic testing and model updating. *Composites Part B: Engineering* 2021;224. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109212>.
- [28] Russo S. Damage assessment of GFRP pultruded structural elements. *Composite Structures* 2013;96:661–9. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.014>.
- [29] Carden EP, Fanning P. Vibration based condition monitoring: A review. *Structural Health Monitoring* 2004;3:355–77. <https://doi.org/10.1177/1475921704047500>.
- [30] Doebling ScottW, Farrar CR, Prime MB, Shevitz DW. Damage identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in their vibration Characteristics: A Literature Review. Los Alamos, New Mexico: 1996.
- [31] Malveiro J, Ribeiro D, Sousa C, Calçada R. Model updating of a dynamic model of a composite steel-concrete railway viaduct based on experimental tests. *Engineering Structures* 2018;164:40–52. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.057>.
- [32] Tam JH, Ong ZC, Ismail Z, Ang BC, Khoo SY. Identification of material properties of composite materials using nondestructive vibrational evaluation approaches: A review. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 2017;24:971–86. <https://doi.org/10.1080/15376494.2016.1196798>.
- [33] Kessler SS, Spearing SM, Atalla MJ, Cesnik CES, Soutis C. Damage detection in composite materials using frequency response methods. *Composites Part B: Engineering* 2002;33:87–95. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(01\)00050-6](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(01)00050-6).
- [34] Maia NMM, Montalvão D, Ribeiro AMR. A review on vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite material. *Shock and Vibration Digest Journal* 2006.
- [35] Albuquerque NB de. Construção e Comportamento Mecânico de um Módulo de Ponte Tenségrita utilizando Materiais Naturais. Pontifícia Universidade Católica, 2020.

- [36] Shin K, Hammond JK. Fundamentals of Signal Processing: for Sound and Vibration Engineers. 2008.
- [37] Allemang RJ, Brown DL. A Complete Review of the Complex Mode Indicator Function (CMIF) with Applications. 2006.
- [38] ARTeMIS modal pro. Structural-Vibration-Solutions 2019.
- [39] Ansys Student 2021.
- [40] Mondal S. Identification of in-plane and out-of-plane elastic parameters of orthotropic composite structures identification of material parameters of pultruded FRP 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1992.8729>.
- [41] Deobald LR, Gibson RF. Determination of elastic constants of orthotropic plates by a modal analysis/Rayleigh-Ritz Technique. J Sound Vib 1988;124:269–83.
- [42] Cardoso DCT, Togashi BS. Experimental investigation on the flexural-torsional buckling behavior of pultruded GFRP angle columns. Thin-Walled Structures 2018;125:269–80. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.01.031>.
- [43] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 1 2017. <https://doi.org/10.1520/D0638-14>.
- [44] Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture 1 2017. https://doi.org/10.1520/D6641_D6641M-16E02.
- [45] Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 1 2017. <https://doi.org/10.1520/D0790-17>.
- [46] ATPC Engenharia física. Sonelastic 2015.
- [47] Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration 1 2015. <https://doi.org/10.1520/E1876-21>.
- [48] Otani LB. Caracterização dos módulos elásticos de compósitos utilizando a Técnica de Excitação por Impulso 2014. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2599.8248>.
- [49] Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus 1 2019. <https://doi.org/10.1520/B0117-19>.

- [50] Standard Test Method for Water Absorption of Plastics 2018.
- [51] Barbero EJ. Finite element analysis of composite materials using ansys. 2º. CRC Press; 2014.
- [52] Jones RM. Mechanics of Composite Materials. 2º Edição 1999.
- [53] Ismael G, López-Aenlle M, Pelayo F, Fernández-Canteli A. Dynamic Behavior of Supported Structures from Free-Free Modal Tests Using Structural Dynamic Modification. Shock and Vibration 2018;2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3130292>.
- [54] García-Palacios J, M. Díaz I, Soria JM, Cara FJ, García S. Uncertainty optimization of Automated Operational Modal Analysis applied to Structural Health Monitoring techniques. 6th World Conference on Structural Control and Monitoring 2014:1420–7.
- [55] Brandt A. Noise and vibration analysis: signal analysis and experimental procedures. 1st ed. Wiley & Sons; 2011.
- [56] Avitabile P. Modal Testing: A Practitioner's guide. John Wiley & Sons; 2018.
- [57] Ewins D. Modal testing. Theory, practice and application. 2º. 2000.
- [58] Gu H. Dynamic mechanical analysis of the seawater treated glass/polyester composites. Materials and Design 2009;30:2774–7. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.029>.