

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

ANA CAROLINA PAULINO DA SILVA

METODOLOGIA DE RASTREAMENTO POR IMAGEM EM UMA ESTRUTURA
TUBULAR PARA A DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Joinville
2024

ANA CAROLINA PAULINO DA SILVA

METODOLOGIA DE RASTREAMENTO POR IMAGEM EM UMA ESTRUTURA
TUBULAR PARA A DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Naval do Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. André Luís Condino Fugarra

Joinville
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Silva , Ana Carolina Paulino da
Metodologia de rastreamento por imagem em uma est / Ana
Carolina Paulino da Silva ; orientador, André Luís Condino
Fujarra , 2024.
43 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. Determinação do módulo de
elasticidade . I. Fujarra , André Luís Condino. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Naval. III. Título.

ANA CAROLINA PAULINO DA SILVA

METODOLOGIA DE RASTREAMENTO POR IMAGEM EM UMA ESTRUTURA
TUBULAR PARA A DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi
julgado adequado para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Naval, na
Universidade Federal de Santa Catarina,
Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 11 de Dezembro de 2024.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

Andre Luis Condino Fajarra

Data: 18/12/2024 14:03:12-0300

CPF: ***.739.388-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Orientador: Dr. André Luís Condino Fajarra
Orientador
Presidente

Prof. Dr. Marcos Alves Rabelo
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais, Cristiane Aparecida Klutcnikas e Anthony Eustáquio Ferreira a e minha Avó Ana Maria de Souza, que sob muito sol, fizeram-me chegar até aqui, na sombra.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Oxalá e a toda espiritualidade, por guiarem meu caminho até aqui, me mostrando, dia após dia, que com fé tudo é possível.

Expresso minha profunda gratidão aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado nessa jornada. Ainda lembro com clareza do dia em que fui aprovada no vestibular para Engenharia Naval: a alegria que senti e a preocupação do meu pai com nossa condição financeira. Recordo-me do momento em que ele vendeu nosso único carro para que eu pudesse seguir com meus estudos e realizar meu sonho. Lembro, também, das incontáveis ligações que fiz, muitas vezes desesperada, após notas baixas, e dos conselhos e palavras de conforto que sempre me fortaleceram. Este diploma não é apenas resultado do meu esforço, mas uma conquista coletiva, fruto da fé, do amor e da dedicação da nossa família.

À minha avó, Ana Maria, dedico um agradecimento especial por seus conselhos repletos de sabedoria e por todas as vezes que me ouviu e acolheu. Obrigada por me lembrar da minha força nos momentos em que eu mesma duvidava dela. Sem o apoio incondicional da minha família, nada disso teria sido possível.

Aos amigos que fiz ao longo desses anos de graduação, minha eterna gratidão. A presença de vocês tornou esse caminho mais leve e suportável. Em especial, agradeço à Karen Soares, que me mostrou o valor de uma amizade verdadeira, algo raro nos tempos atuais, e ao Matheus Linderson, por me ensinar que a amizade genuína transcende objetivos diferentes e distâncias, mostrando que ela pode durar para sempre.

Ao meu orientador, Prof. Dr. André Luís Condino Fajarra, deixo meu reconhecimento e respeito. Agradeço por sua paciência, dedicação e por compartilhar tanto conhecimento, seja em sala de aula ou em projetos que tivemos a honra de desenvolver juntos. Ser sua orientanda neste último capítulo da minha graduação foi, sem dúvida, uma honra. Por fim, expresso minha mais profunda gratidão à Petrobras pelo inestimável apoio concedido ao longo desses dois anos como bolsista no Laboratório de Integração Fluido-Estrutura. O conhecimento adquirido nesse período foi indispensável para a realização deste trabalho. Agradeço também à empresa Hidromave pela generosa doação de 15 metros da mangueira hidráulica R5, que serviu como base para o desenvolvimento deste projeto. Por fim, estendo meus agradecimentos a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este projeto se concretizasse e fosse apresentado. A cada um de vocês, meu mais sincero obrigado.

RESUMO

O estudo da rigidez flexional estático e dinâmico é essencial em projetos de engenharia, pois possibilita a compreensão do comportamento dos materiais sob diferentes condições de carga e movimento. A rigidez flexional estática descreve a resposta dos materiais a deformações causadas por forças constantes, enquanto a rigidez flexional dinâmica está relacionado à resposta dos materiais submetidos a vibrações ou variações temporais de carga. Em sistemas compostos, como os formados por materiais heterogêneos, a rigidez equivalente pode ser usada para caracterizar a capacidade do sistema de resistir a deformações sob a aplicação de forças externas. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar a rigidez equivalente de uma mangueira flexível R5, através da análise dos módulos de elasticidade estático e dinâmico de um tubo de alumínio bem como a rigidez flexional equivalente de uma mangueira flexível, e do conjunto. Para isso, foram realizados experimentos de deflexão estática e decaimento, utilizando um sistema de rastreamento por imagem e o programa Octave para processamento dos dados. Os resultados obtidos para o tubo de alumínio demonstraram uma elevada concordância entre os módulos de elasticidade experimental e analítico, com pequenas discrepâncias atribuídas a simplificações teóricas no modelo. No caso da mangueira flexível, os experimentos indicaram um comportamento mais elástico, evidenciando sua maior capacidade de deformação elástica em comparação com o alumínio, confirmando que o método indireto utilizado para determinar a rigidez flexional da mangueira mostrou-se eficaz, fornecendo resultados consistentes e alinhados com os objetivos do estudo.

Palavras-chave: Rigidez Equivalente, Ensaio Dinâmico e Estático, Mangueira flexível, Sistema de Rastreamento por Imagem, Octave.

ABSTRACT

The study of static and dynamic flexural stiffness is essential in engineering projects, as it allows the understanding of the behavior of materials under different load and movement conditions. Static flexural stiffness describes the response of materials to deformations caused by constant forces, while dynamic flexural stiffness is related to the response of materials subjected to vibrations or temporal variations in load. In composite systems, such as those formed by heterogeneous materials, equivalent stiffness can be used to characterize the system's ability to resist deformations under the application of external forces. In this context, the objective of this work was to characterize the equivalent stiffness of a flexible hose R5, through the analysis of the static and dynamic elasticity modules of an aluminum tube as well as the equivalent flexural stiffness of a flexible hose, and of the assembly. For this, static deflection and decay experiments were performed, using an image tracking system and the Octave program for data processing. The results obtained for the aluminum tube demonstrated a high agreement between the experimental and analytical elasticity moduli, with small discrepancies attributed to theoretical simplifications in the model. In the case of the flexible hose, the experiments indicated a more elastic behavior, evidencing its greater capacity for elastic deformation compared to aluminum, confirming that the indirect method used to determine the flexural stiffness of the hose proved to be effective, providing consistent results aligned with the objectives of the study.

Keywords: Equivalent Stiffness, Dynamic and Static Tests, Flexible Hose, Image Tracking System, Octave.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de configurações de risers flexíveis	14
Figura 2 – Viga com deflexão infinitesimal	17
Figura 3 – Viga engastada com carregamento na extremidade livre	19
Figura 4 – Incerteza-padrão para as três funções de densidade de probabilidade	24
Figura 5 – mangueira Hidráulica R5	25
Figura 6 – Fixação do modelo de alumínio	26
Figura 7 – Equipamentos utilizados do OptiTrack.	27
Figura 8 – Bancada de Análise	28
Figura 9 – Tripé Manfrotto Super Clamp	28
Figura 10 – CW-500 na disposição A	29
Figura 11 – Resultado da calibração	29
Figura 12 – Calibration Square	30
Figura 13 – Massas utilizadas no ensaio.	31
Figura 14 – Mangueira hidráulica preparada para o ensaio.	32
Figura 15 – Registro do ensaio de deflexão estática.	32
Figura 16 – Deslocamento inicial para obter o decaimento	33
Figura 17 – Decaimento da mangueira hidráulica_R5 com o tubo de alumínio . .	34
Figura 18 – Decaimento do tubo de Alumínio	34
Figura 19 – Frequência Dominante do decaimento do tubo de alumínio	38
Figura 20 – Frequência Dominante do decaimento do conjunto (mangueira + alumínio)	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – <i>Parâmetros Geométricos da Mangueira Hidráulica R5</i>	26
Tabela 2 – <i>Pesos utilizados no ensaio estático</i>	31
Tabela 3 – <i>Resultado experimental do Módulo de Elasticidade Estático</i>	35
Tabela 4 – <i>Rigidez Flexional experimental</i>	37
Tabela 5 – <i>Resultado experimental do Módulo de Elasticidade Dinâmico</i> . . .	39
Tabela 6 – <i>Rigidez Flexional experimental</i>	39

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Constante de Integração;
B	Constante de Integração;
E	Módulo de elasticidade;
I	Momento de Inércia;
L	Comprimento da viga;
M	Momento Fletor;
O'	Centro de curvatura;
a	Distância entre o engaste e a força aplicada;
d	Diâmetro do corpo de prova em metros;
dv	Deflexão;
f	Frequência longitudinal;
k	Curvatura;
l	Comprimento do corpo de prova em metros;
m	Massa do corpo de prova;
μ	Coefficiente de Poisson;
ρ	Raio de curvatura;
s	Desvio-padrão experimental da média;
s^2	Variância experimental;
σ	Densidade de probabilidade retangular;
θ	Ângulo de inclinação;
u	Incerteza padrão;
u_a^2	Incerteza-padrão tipo A;
u_b^2	Incerteza-padrão tipo B;
u_c^2	Incerteza-padrão combinada;
w	Força aplicada;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos Específicos	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Risers Flexíveis	13
2.2	Viscoelasticidade	14
2.2.1	Viscoelasticidade Linear	15
2.3	Teoria de Deflexão de Vigas	17
2.3.1	Equação Diferencial para Curva de Deflexão	17
2.3.2	Viga engastada com carregamento concentrado na extremidade livre	19
2.4	Análise Dinâmica do Módulo de Elasticidade	20
2.5	Análise de Fourier	21
2.6	Análise de Incertezas	22
3	METODOLOGIA	25
3.1	Modelo Experimental	25
3.2	Sistema de rastreamento por imagem	26
3.3	Abordagem Experimental	30
3.3.1	Ensaio de Decaimento	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Análise da Rigidez Flexional para o ensaio de deflexão Estático	35
4.2	Análise da rigidez flexional através do ensaio de decaimento	37
5	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Rabelo (2009), a produção de gás e petróleo no Brasil vem aumentando significativamente, principalmente com a exploração em águas profundas e ultra profundas. Esse fato permitiu ao Brasil chegar a auto-suficiência de petróleo, na qual as plataformas acessam os campos petrolíferos no fundo do mar por dutos flexíveis ou rígidos que transportam o material para os navios ou plataformas em operação Rabelo (2009).

Segundo Rabelo (2009), a utilização de dutos flexíveis para o transporte de fluidos bem como dos cabos umbilicais que são utilizados para a comunicação e controle dos poços em águas profundas. Esses tubos flexíveis são denominados risers, que ligam a cabeça do poço no fundo do mar à plataforma, na qual é dimensionado de acordo com a necessidade de cada projeto e a quantidade de petróleo a ser transportado, Ornellas (2014).

Um duto flexível é composto por um ou mais tramos conectados que permitem o escoamento seguro e eficiente de fluidos entre instalações, proporcionando contenção de pressão e durabilidade. A construção desse tipo de duto envolve materiais variados em camadas que conferem uma baixa rigidez flexional, aliada a uma elevada resistência à tração axial, garantindo sua funcionalidade e segurança a longo prazo, Milanez (2018).

Essa combinação é viável devido ao processo construtivo que integra diferentes materiais em várias camadas, conforme explicado por Milanez (2018). Essas estruturas são classificadas como *Bonded Flexible Pipe* e *Unbonded Flexible Pipe*. O *Bonded Flexible Pipe* possui uma ou mais camadas que compõem a estrutura tubular aderidas a outras camadas, normalmente incluindo uma camada metálica e outra elastomérica. Em contrapartida, as camadas das estruturas do tipo *Unbonded* são aplicadas de forma independente, sem que haja aderência entre elas.

Outra forma de classificação baseia-se na localização da aplicação. Os dutos que estão, total ou parcialmente, apoiados ou enterrados no fundo do mar e que estão predominantemente sujeitos a cargas estáticas são definidos como flowlines. Por outro lado, os dutos que conectam as unidades marítimas às estruturas subaquáticas são classificados como risers, sendo estes o foco de análise deste trabalho, Milanez (2018)

Durante a fase de projeto, o dimensionamento e a seleção de materiais para dutos flexíveis consideram os mecanismos e modos de falha potenciais, especialmente aqueles relacionados a altas tensões e deformações, corrosão, erosão, fadiga, fragilização por hidrogênio e envelhecimento de polímeros, entre outros fatores críticos, Milanez (2018).

Desta forma, o objetivo deste trabalho é investigar a rigidez flexional do sistema

composto por uma mangueira flexível e um tubo de alumínio, uma vez que, sem o fator de escala, esse sistema assemelha-se a um riser devido à sua construção em camadas com materiais distintos. A similaridade estrutural com os risers é evidenciada pela combinação de materiais heterogêneos, que conferem ao sistema propriedades mecânicas particulares. A análise da rigidez flexional neste contexto visa compreender como as interações entre os materiais afetam o comportamento global do sistema, sendo fundamental para investigações dinâmicas e caracterizações modais, além de contribuir para o aprimoramento de procedimentos voltados às pesquisas de linhas offshore.

1.1 OBJETIVOS

Nessa seção serão apresentados os objetivos gerais e específicos deste trabalho

1.1.1 Objetivo Geral

Análise de rastreamento por imagem para a obtenção da rigidez flexional equivalente de uma mangueira flexível para fins de representação qualitativa e simplificada de um riser flexível, ainda sem a preocupação com a escala.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar conceitos referente ao modelo de viga em balanço;
- Estabelecer a metodologia do rastreamento por imagem;
- Realização do ensaio de decaimento e de deflexão estática;
- Determinação da rigidez flexional de uma mangueira flexível;
- Realizar uma análise de incerteza referente aos dados experimentais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

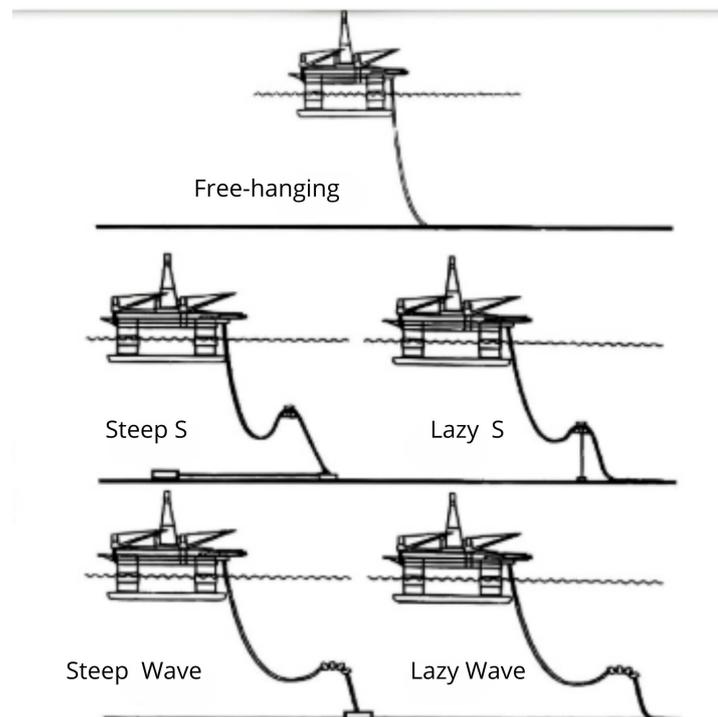
Neste capítulo, serão introduzidos os conceitos essenciais sobre risers flexíveis, destacando suas características, funcionamento e relevância no contexto da engenharia offshore. Em seguida, serão apresentados os fundamentos da viscoelasticidade, abordando suas principais características e a interação entre propriedades elásticas e viscosas em materiais complexos. Também será detalhada a teoria de deflexão em vigas, com foco nos fundamentos matemáticos que descrevem a deformação de elementos estruturais sob diferentes tipos de carregamento. O caso específico estudado neste trabalho será explorado posteriormente, com a devida contextualização para a aplicação das teorias descritas. Por fim, serão discutidas as análises de incerteza, enfatizando sua importância na validação dos resultados e na avaliação da confiabilidade dos modelos adotados.

2.1 RISERS FLEXÍVEIS

Um riser é uma estrutura sujeita a cargas estáticas ou dinâmicas, que conecta uma unidade marítima, como uma plataforma, boia ou embarcação, a uma instalação no solo marinho ou a outra unidade marítima. Os risers podem estar livremente suspensos em configuração de catenária, parcialmente sustentados por boias ou pesos mortos, ou completamente restritos, podendo ser enclausurados em tubulações, API.17B (1998).

Os risers flexíveis podem ser instalados em diversas configurações, como ilustrado na Figura 1, sendo a Catenária Livre (Free-hanging) a mais utilizada devido a vantagens econômicas, de fabricação e de instalação, pois requer um menor número de acessórios e equipamentos. A catenária corresponde à curva formada por um cabo suspenso sob o efeito do próprio peso. Outras configurações, conhecidas como amortecidas ou autossustentadas, são adotadas como alternativas para reduzir os esforços e/ou movimentos no topo, permitindo operações em maiores profundidades ou em regiões sujeitas a furacões e fenômenos naturais semelhantes, API.17B (1998).

Figura 1 – Exemplos de configurações de risers flexíveis



Fonte: (API.17B (1998), pg 09).

A seção 2.1 teve como objetivo descrever o riser flexível, considerando que o modelo analisado no estudo representa uma aproximação estrutural dessa estrutura offshore, embora não em escala. Além disso, ressalta-se que a validação do modelo não faz parte do escopo deste trabalho.

Dado que os risers flexíveis estão sujeitos a cargas estáticas e dinâmicas que dependem das interações entre seus materiais e o ambiente marinho, é fundamental compreender a viscoelasticidade linear, apresentada na Seção 2.2.1, pois ela descreve como os materiais que compõem essas estruturas combinam comportamentos elásticos e viscosos, influenciando diretamente sua resposta às solicitações mecânicas e dinâmicas.

2.2 VISCOELASTICIDADE

A viscoelasticidade é um comportamento que combina características de materiais puramente elásticos e viscosos. Nesse fenômeno, considera-se não apenas a relação entre tensão e deformação, mas também como a deformação evolui ao longo do tempo, Ward et al. (2004). Enquanto o comportamento elástico é governado pela lei de Hooke, o comportamento viscoso é descrito pela lei de Newton para fluidos viscosos. Assim, será feita uma breve introdução à lei de Newton para a viscosidade linear e,

posteriormente, apresentado o conceito de viscoelasticidade linear, que representa uma combinação dos dois comportamentos mencionados.

2.2.1 Viscoelasticidade Linear

Os polímeros são materiais que exibem um comportamento intermediário entre o de um sólido elástico e o de um líquido viscoso, dependendo da temperatura e da escala de tempo do experimento. Essa propriedade é conhecida como viscoelasticidade, Pessan L. A; Hage Jr (2002).

Para líquidos simples a viscosidade pode ser considerada como uma propriedade constante do material, onde a viscosidade resulta da razão entre a tensão de cisalhamento desenvolvida pelo fluido e a aceleração, como demonstra a Equação 1.

$$\tau_{cis} = \eta \dot{y}, \quad (1)$$

$$\dot{y} = \frac{dv}{dx}, \quad (2)$$

onde τ_{cis} é a tensão de cisalhamento, x o deslocamento, v a velocidade, \dot{y} é a taxa de cisalhamento e η a viscosidade. Esta definição é válida somente no regime linear e fluxo laminar.

Para materias complexos como os polímeros fundidos a viscosidade não se encontra constante com o aumento da taxa de cisalhamento, portanto são chamados de não-Newtonianos, Morton-Jones (1989). Polímeros podem ser deformados por esforço de tração e viscosidade inerente, nesse caso é dada pela Equação 3

$$\lambda = \frac{\sigma}{\dot{y}(\sigma)}, \quad (3)$$

onde λ é a viscosidade por tração, σ é a tensão por tração, $\dot{y}(\sigma)$ é a taxa de deformação por tração. E λ é aproximadamente 3η , Krevelen (1990).

A lei da viscosidade de Newton define a viscosidade η como demonstra a Equação 4

$$\sigma = \eta \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (4)$$

onde η é o coeficiente de atrito viscoso, v a velocidade e y a direção do gradiente de velocidade, para uma análise no gradiente no plano xy , segue-se a Equação 5.

$$\sigma = \eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right), \quad (5)$$

onde $\partial v_x / \partial y$ e $\partial v_y / \partial x$, são os gradientes de velocidade nas direções x e y respectivamente.

Visto que $v_x = \partial u / \partial t$ e $v_y = \partial v / \partial t$ e que u e v são os deslocamentos nas direções x e y e e_{xy} a deformação no plano xy tem-se a Equação 6.

$$\sigma_{xy} = \frac{\partial e_{xy}}{\partial t} \quad (6)$$

Observa-se então que a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional de à taxa de velocidade por cisalhamento com o tempo, no qual essa formulação traz a semelhança entre a lei de Hooke para os sólidos elásticos e a lei de Newton para fluidos viscosos, Ward et al. (2004).

A lei de Hooke descreve o comportamento de um sólido elástico linear, enquanto a lei de Newton se aplica a um líquido viscoso linear. A relação que caracteriza as propriedades de um sólido viscoelástico linear é obtida pela combinação dessas duas leis.

Para o comportamento elástico:

$$(\sigma_{xy})_e = G \cdot \epsilon_{xy}, \quad (7)$$

onde G é o módulo de cisalhamento. Para o comportamento viscoso utiliza-se a Equação 8

$$(\sigma_{xy})_v = \eta \frac{\partial e_{xy}}{\partial t} \quad (8)$$

Para sólidos elásticos, a lei de Hooke é válida apenas para pequenas deformações, enquanto a lei de Newton para a viscosidade é restrita a fluxos laminares com baixas velocidades. Normalmente, previsões quantitativas só são possíveis no caso de viscoelasticidade linear, onde os resultados de variação de tensão ou deformação são simplesmente aditivos, embora o tempo necessário para essa mudança deva ser considerado. Para carregamentos simples, a relação entre tensão e deformação deve ser linear dentro de um determinado intervalo de tempo. Carregamentos múltiplos podem ser analisados com base no princípio da superposição de Boltzmann, já que cada aumento de tensão pode ser tratado como uma contribuição independente para a deformação total, Ward et al. (2004).

Compreender o comportamento viscoelástico linear descrito na Seção 2.2.1 é essencial para analisar a deflexão de estruturas como vigas, apresentada na Seção 2.3, uma vez que o material ensaiado, uma mangueira flexível, pode ser aproximado a um modelo estrutural que combina as propriedades viscoelásticas de seus componentes com a análise de deformações e carregamentos ao longo de sua extensão.

2.3 TEORIA DE DEFLEXÃO DE VIGAS

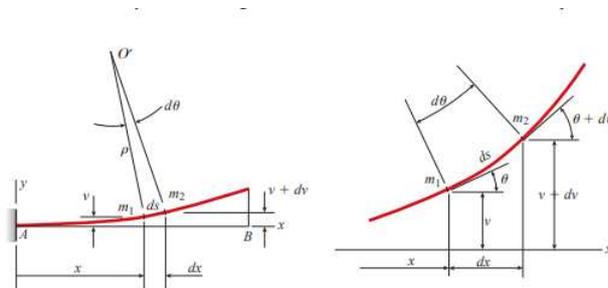
2.3.1 Equação Diferencial para Curva de Deflexão

Uma viga é uma estrutura cuja uma das dimensões é muito maior que as outras duas, sendo capaz de suportar cargas aplicadas transversalmente ao seu eixo principal. Esse eixo se estende ao longo da maior dimensão da viga, enquanto a seção transversal corresponde ao plano perpendicular a ele, Belendez T.; Neipp (2002).

Muitas estruturas na engenharia são compostas pela montagem e acoplamento de várias vigas. O estudo da teoria das vigas é especialmente vantajoso na fase de projeto de uma estrutura, pois oferece uma estimativa valiosa de seu comportamento. Diferentes teorias de vigas podem ser aplicadas, gerando variados níveis de precisão nos resultados, Bauchauz O; Craig (2009).

Para determinar a curva de deflexão de uma viga, é necessário formular uma equação diferencial que permita calcular o deslocamento vertical em qualquer ponto da viga. Para isso, considere a viga deformada conforme ilustrado na Figura 2 , onde a deflexão na direção y é considerada positiva para cima.

Figura 2 – Viga com deflexão infinitesimal



Fonte: (Gere (2004), pg 481).

Ao observar os pontos m_1 e m_2 , separados por uma distância dx , nota-se um incremento de deflexão dv e um aumento do ângulo de rotação $d\theta$. Se as linhas normais às tangentes nesses pontos m_1 e m_2 se cruzam em um ponto O' , então esse ponto é chamado de centro de curvatura , conforme a seguinte Equação 9:

$$\rho d\theta = ds \quad (9)$$

A curvatura κ é definida como o inverso do raio de curvatura ρ e é expressa pela seguinte Equação 10:

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} \quad (10)$$

A inclinação da curva de deflexão é dada pela primeira derivada dv/dx da expressão da deflexão v . Conforme ilustrado na Figura 1, observa-se que essa inclinação dv/dx é igual à tangente do ângulo de rotação expresso na Equação 11.

$$\theta = \arctan \frac{dv}{dx} \quad (11)$$

Considerando a simplificação de pequenos ângulos para rotação, pode-se admitir $ds = dx$, podendo então reescrever as Equações 9 e 10, respectivamente:

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dx} \quad (12)$$

$$\theta = \tan \theta = \frac{dv}{dx} \quad (13)$$

Consequentemente, se a rotação da viga for pequena, pode-se considerar que o ângulo de rotação e a inclinação $\frac{dv}{dx}$ são aproximadamente iguais. Assim, a curvatura κ pode ser relacionada com a deflexão da viga pela Equação 14, considerando a aplicação da Lei de Hooke:

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (14)$$

O produto EI representa a rigidez flexional da viga, sendo este o principal foco de estudo deste trabalho. Onde E é o módulo de elasticidade do material, e I é o momento de inércia da seção transversal. A Equação 14 é conhecida como a equação diferencial de deflexão de uma viga. Sendo uma equação diferencial ordinária (EDO) de segunda ordem, ela requer duas integrações para determinar uma expressão para v em função do comprimento da viga, sendo a primeira integral a equação da inclinação $\frac{dv}{dx}$. As integrações produzem duas constantes, que são determinadas com base nas condições de contorno associadas ao suporte engastado da viga, sendo estas definidas na origem.

$$v \Big|_{x=0} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{dv}{dx} \Big|_{x=0} = 0 \quad (16)$$

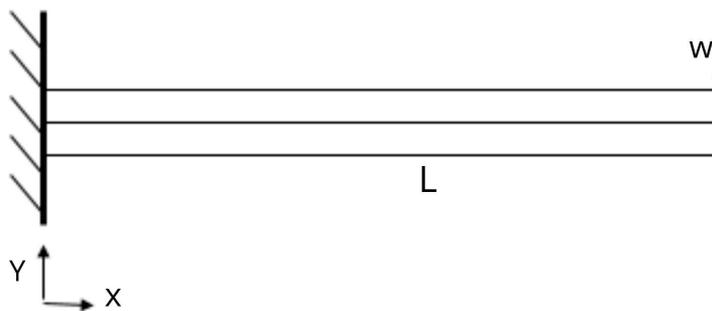
O problema da viga engastada envolve encontrar uma expressão para o momento fletor M e substituí-la na Equação 14 para determinar as grandezas desejadas, Ross et al. (1999). Dessa forma, considera-se a deflexão para o caso de estudo nesse trabalho.

2.3.2 Viga engastada com carregamento concentrado na extremidade livre

A configuração de viga engastada com carregamento concentrado na extremidade livre é amplamente utilizada para a análise experimental da rigidez flexional devido à sua simplicidade na modelagem matemática, que permite calcular o produto EI com base em relações bem estabelecidas entre carga, deflexão e comprimento. Essa configuração maximiza a deflexão para uma dada carga, facilitando medições precisas, e suas condições de contorno claras garantem resultados confiáveis, sendo também viável para implementação em laboratório.

O momento fletor em uma viga é calculado pelo produto entre o módulo da força aplicada w , em Newtons, e a distância x , em metros, até o ponto de engastamento, conforme esquematizado na Figura 3. Esse momento é considerado positivo quando orientado no sentido anti-horário, Ross et al. (1999)

Figura 3 – Viga engastada com carregamento na extremidade livre



Fonte: Autoral, 2024

17. Sendo considerado uma força aplicada em um ponto x , obtém-se a Equação

$$M(x) = -w(L - x) \quad (17)$$

No qual L é o comprimento total da viga, ao ser substituída na equação 14 e integrada duas vezes, obtém-se a Equação 18.

$$EIv(x) = w\left(\frac{Lx^2}{2} - \frac{x^3}{6}\right) + Ax + B \quad (18)$$

Na qual o A e B , são constantes de integração obtidas nas Equações 15, 16. Resultando na Equação 19, que é a curva de deflexão.

$$EIv(x) = -\frac{wx^2}{6}(3L - x) \quad (19)$$

Para obter a deflexão máxima basta que x seja igual a L , gerando a Equação 20.

$$v|_{x=L} = -\frac{wL^3}{3} \quad (20)$$

2.4 ANÁLISE DINÂMICA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Ensaio dinâmico de natureza não destrutiva permite obter informações globais e integradas sobre a rigidez e o amortecimento da estrutura, sendo passíveis de repetição e comparação ao longo do tempo. Esses ensaios são particularmente úteis na elaboração de projetos estruturais, pois possibilitam o monitoramento do módulo de elasticidade do material ao longo da vida útil da estrutura, utilizando apenas um único corpo de prova. Com a análise do módulo de elasticidade, torna-se viável estimar a rigidez flexional do material, um parâmetro essencial para o projetista, Diogenes et al. (2011).

Quando surge uma fissura (dano) na seção de uma viga, ocorre uma redução no momento de inércia, proporcional à abertura e ao comprimento da fissura, o que leva a uma diminuição da rigidez local à flexão. Conseqüentemente, há uma redução nos valores das frequências naturais de flexão, Almeida.S.F. (2005)

O método para determinar a frequência baseia-se na identificação da frequência natural do elemento em análise. A partir do valor da frequência natural de vibração (f), e com o conhecimento da massa (m) e da geometria do corpo de prova, é possível estimar o módulo de elasticidade dinâmico. Essa relação foi desenvolvida por Euler-Bernoulli, utilizando equações que descrevem o comportamento viscoelástico de materiais considerados sólidos homogêneos e isotrópicos. Nessas condições, assume-se que a relação entre comprimento e largura é suficientemente grande para que os efeitos de cisalhamento e inércia rotacional possam ser desprezados, Almeida.S.F. (2005).

$$E = \frac{4\pi^2}{c^2 I} m l^3 f^2 \quad (21)$$

onde I representa o momento de inércia da seção transversal, l é o comprimento da amostra, e c é um coeficiente que depende das condições de contorno e do modo de vibração.

No contexto deste estudo, a frequência dominante será obtida por meio do ensaio de decaimento, no qual um deslocamento inicial é aplicado à estrutura, que então oscila livremente, permitindo a determinação de sua frequência natural.

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, utiliza-se a Equação 22.

$$E = D_m \cdot m \cdot f_t^2 \quad (22)$$

A análise para cilindros utilizada nesse trabalho é através da Equação 23.

$$D_m = 5.093 \frac{l}{d^2} \quad (23)$$

Onde l é o comprimento do modelo em metros, e d é o diâmetro do cilindro em metros.

2.5 ANÁLISE DE FOURIER

A análise de Fourier é uma ferramenta essencial neste trabalho, pois permite identificar com precisão as frequências predominantes em um ensaio de decaimento, sendo fundamental para caracterizar o comportamento dinâmico do sistema analisado.

A expansão por Série de Fourier, dada pela Equação 24, permite a caracterização de qualquer função periódica como uma sobreposição de funções harmônicas (RAO, 2018). Ela pode ser representada tanto no domínio do tempo quanto no da frequência.

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (24)$$

Considerando números complexos e que as frequências das componentes harmônicas (ω) são múltiplos da frequência fundamental ($\delta\omega = \frac{2\pi}{\tau}$), a Equação 24 pode ser utilizada para a análise de sinais periódicos.

A expansão por Série de Fourier pode ser reescrita como:

$$\xi(t) = a_0 + \sum_{r=1}^{\infty} \left(a_r \cos\left(\frac{2\pi r t}{\tau}\right) + i b_r \sin\left(\frac{2\pi r t}{\tau}\right) \right), \quad (25)$$

onde $b_r = 0$ por definição, e a_r pode ser calculado por:

$$a_0 = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \xi(t) dt. \quad (26)$$

Conforme Fajarra (2015), na representação no domínio da frequência, uma abordagem mais sintética, o movimento harmônico pode ser caracterizado apenas pela frequência e pela amplitude da oscilação. Em contrapartida, na representação no domínio do tempo, é necessário um número muito maior de coordenadas $(x; t)$.

Como mencionado anteriormente, a análise de Fourier representa uma relação direta entre os domínios. Na transformação do domínio do tempo para o domínio da frequência, há perda de informação sobre o instante inicial do sistema, Fajarra (2015). Contudo, neste trabalho, o foco está na dinâmica do modelo, de modo que o instante inicial não será considerado.

Além disso, para garantir que a representação no domínio da frequência seja equivalente às características do domínio do tempo, é necessário que o tempo total de análise seja suficientemente grande, a fim de capturar todos os comportamentos dinâmicos de interesse. Por esse motivo, em ensaios experimentais, mesmo após o decaimento de energia, o rastreamento de imagem é mantido.

De acordo com Fugarra (2015), os registros de dinâmica são assinalados de maneira discreta por meio de uma frequência de amostragem definida pela Equação (27):

$$f_s = \frac{N}{\tau}, \quad (27)$$

onde N é o número de amostras do registro.

Dessa forma, os coeficientes da expansão de Fourier podem ser obtidos utilizando a Fast Fourier Transform (FFT), que realiza a transcrição do registro temporal da dinâmica para sua representação no domínio da frequência. A transformação é expressa pela seguinte equação:

$$\xi(T) = \sum_{r=0}^{N-1} 2\sqrt{a_r^2 + b_r^2} \cos(\omega_r T + \delta_r), \quad (28)$$

onde a_r e b_r são os coeficientes da expansão de Fourier, ω_r representa a frequência angular e δ_r é a fase correspondente.

A equação da FFT é fundamental para calcular as frequências naturais obtidas experimentalmente. É através dessa transformada que os dados coletados pelo sistema de rastreamento de imagem são transformados em resultados na forma de picos de frequência.

2.6 ANÁLISE DE INCERTEZAS

A análise de incertezas é indispensável neste trabalho, pois garante a confiabilidade dos resultados experimentais ao quantificar e avaliar as possíveis variações nos dados, permitindo uma interpretação mais precisa e fundamentada dos resultados obtidos.

De acordo com Araujo (2017) a incerteza de uma medição é a dúvida sobre a precisão do resultado obtido, e ela nos fornece informações sobre a qualidade da medição. A medição é o processo de medir, enquanto a medida é o resultado desse processo. O mensurando, por sua vez, refere-se à grandeza específica que está sendo medida. A incerteza-padrão é o resultado de uma medição que é expressa como um desvio-padrão. Existem dois tipos de incerteza: a do tipo A (u_a^2) que é derivada da análise estatística de múltiplas observações, e a do tipo B (u_b^2) que está associada a incertezas provenientes de outras fontes ou métodos, Araujo (2017). Além disso, há a

incerteza-padrão combinada, que resulta da combinação em quadratura das incertezas do tipo A e do tipo B, conforme ilustrado pela equação 29

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (29)$$

Araujo (2017) também afirma que o resultado de uma medição é apenas uma estimativa do valor do mensurando. Portanto, para o experimento que será realizado neste trabalho, é essencial fornecer uma declaração quantitativa da incerteza. A incerteza do tipo B, que neste caso refere-se à calibração do instrumento, é representada por uma função de densidade de probabilidade retangular. Isso ocorre porque se trata de uma única medida digital, e a incerteza associada a essa distribuição retangular é calculada através da equação 30:

$$\sigma = \frac{x_{max} - x_{min}}{2} \quad (30)$$

Para a incerteza do tipo A, foi utilizada a função de densidade de probabilidade gaussiana, que é aplicável quando há uma série de medidas repetidas e dispersas. Nesse caso, a melhor estimativa do valor esperado do mensurando é dada pela média aritmética dos resultados x_i , de acordo com a equação 31:

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} x_i \quad (31)$$

A variância experimental é calculada pela equação 32:

$$s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{\infty} (\tilde{x} - x_i)^2 \quad (32)$$

O desvio-padrão experimental pode ser calculado usando a equação 33:

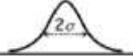
$$s(\tilde{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (33)$$

Uma melhor estimativa para o desvio-padrão, para a gaussiana é a raiz quadrada da variância, a incerteza padrão calculada é dada por :

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (34)$$

O nível de confiança indica a probabilidade de que o valor medido se encontre dentro do intervalo da incerteza padrão. Em alguns casos, pode ser necessário aumentar o nível de confiança nos resultados dos experimentos. Segundo Araujo (2017), isso pode ser feito utilizando a incerteza expandida U , que é obtida multiplicando a incerteza padrão u pelo fator de abrangência k . Esse fator depende do tipo de função de densidade de probabilidade e do nível de confiança desejado, que se relaciona com a área da função de densidade dentro do intervalo definido pela incerteza padrão u .

Figura 4 – Incerteza-padrão para as três funções de densidade de probabilidade

Função de densidade de probabilidade		Incerteza-padrão u	Quando usar
retangular		$u = \frac{a}{2\sqrt{3}}$	Quando se conhece apenas os valores máximos e mínimos de variação. Exemplo: efeito causado pela resolução finita do equipamento
triangular		$u = \frac{a}{2\sqrt{6}}$	Quando se conhece os valores máximo e mínimo de variação e o valor mais provável. Exemplo: posicionamento de um instrumento em uma marca de escala.
gaussiana		$u = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	Desvio-padrão da média de um conjunto de n medições repetidas.

Fonte: (Araujo (2017)).

A Figura 4 apresenta as três funções de densidade de probabilidade. Para as análises realizadas, será adotada a incerteza-padrão de distribuição retangular, por ser a que melhor representa os dados obtidos.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as características do aparato experimental e as instrumentações que serão utilizadas durante a realização dos estudos propostos. Posteriormente, serão apresentados quais parâmetros analíticos serão dimensionados, seguido da apresentação da metodologia da investigação experimental.

3.1 MODELO EXPERIMENTAL

Neste trabalho, com o objetivo de simular um riser flexível sem a preocupação com aspectos de escala, utilizou-se uma mangueira hidráulica da linha Flexit R5, composta por trama têxtil e fio de aço, conforme ilustrado na Figura 5. Para determinar sua rigidez flexional, foram realizados dois ensaios: um exclusivamente com o tubo de alumínio e outro com o tubo de alumínio inserido na mangueira. A rigidez flexional da mangueira foi então calculada pela subtração dos resultados obtidos nas duas condições.

Figura 5 – mangueira Hidráulica R5



Fonte: (Hidromave, 2024).

Algumas características fundamentais da mangueira flexível, utilizadas neste trabalho, foram obtidas diretamente do site da empresa Hidromave e estão apresentadas na Tabela 1. Além disso, os dados do tubo de alumínio, também utilizado no experimento, estão incluídos na mesma tabela. O tubo de alumínio foi escolhido por garantir a integridade dos resultados experimentais devido ao seu módulo de elasticidade bem definido, igual a 69 GPa e a facilidade para determinar sua inércia, garantindo assim sucesso ao determinar a rigidez flexional, bem como garantir que a mangueira não possua curvatura residual.

Tabela 1 – *Parâmetros Geométricos da Mangueira Hidráulica R5*

Modelo	Di(mm)	De(mm)	Rc (mm)	Peso(Kg/m)
R5-10	21,3	22,09	140	0,57
Alumínio	9,15	21,2		0,018

Fonte: Autoral,2024

No qual os itens da Tabela 1 podem ser descritos como:

- *Di*: Diâmetro Interno do modelo;
- *De*: Diâmetro Externo do modelo;
- *Rc*: Raio de Curvatura do Modelo.

Após a definição das características geométricas de ambos os modelos, foi estabelecido que, para garantir a integridade dos ensaios, seria essencial assegurar uma fixação eficiente. Essa medida teve como objetivo prevenir o desprendimento dos modelos da bancada de testes durante as excitações no ensaio de decaimento e assegurar sua estabilidade nos ensaios de deflexão, configurando-os adequadamente como vigas em balanço. Tanto o modelo do tubo de alumínio quanto o conjunto formado pela mangueira flexível e o tubo de alumínio foram rigidamente fixados em uma de suas extremidades, a Figura 6 demonstra o tubo de alumínio fixado, garantindo as condições necessárias para a realização dos ensaios experimentais.

Figura 6 – Fixação do modelo de alumínio



Fonte: (Autoral, 2024).

3.2 SISTEMA DE RASTREAMENTO POR IMAGEM

O rastreamento por imagem consiste em gravações de movimento, com interatividade em tempo real. Tal procedimento vem sendo utilizado em veículos aéreos não tripulados, em pesquisas científicas e em testes de segurança em veículos e nesse trabalho, como análise no comportamento dinâmico de um riser. Utilizou-se a linha de produtos OptiTrack, que é composta por câmeras de alta velocidade equipadas com obturadores globais para captura de imagem sem interrupções e LEDs de alta

frequência. Dessa forma, essa linha é reconhecida por sua extrema qualidade. A Figura 7 exibe os equipamentos utilizados para a realização desse trabalho.

Figura 7 – Equipamentos utilizados do OptiTrack.

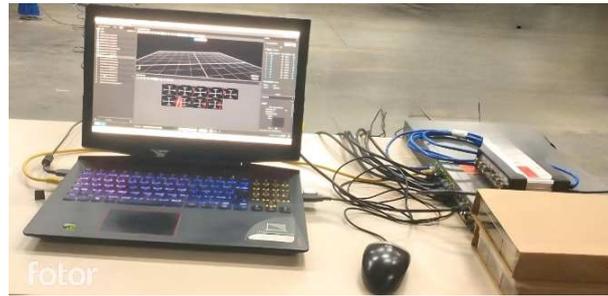


Fonte: (OptiTrack,2024).

Para que o sistema de rastreamento de imagem funcione corretamente, é necessário um computador com sistema operacional Windows e processador *Intel Core i5*, além de garantir que todos os equipamentos ilustrados na Figura 8 estejam em perfeito estado de funcionamento.

A preparação do ensaio começou com a instalação de uma placa de rede no computador, permitindo sua conexão tanto à rede local quanto ao Switch simultaneamente. O Switch atua como o principal ponto de conexão, possibilitando a interligação de outros dispositivos externos ao sistema por meio de cabos Ethernet. Assim, foram conectadas ao Switch duas câmeras Prime 17W e o eSync 2, responsável por sincronizar as imagens capturadas por diferentes câmeras. A Figura 8 representa o esquema de conexões na bancada de análises.

Figura 8 – Bancada de Análise



Fonte: Autoral, 2024.

Para garantir a fixação das câmeras, foram instalados dois tripés do tipo "Manfrotto Super Clamp"; contudo, apenas um deles está ilustrado na Figura.9;

Figura 9 – Tripé Manfrotto Super Clamp



Fonte: Autoral, 2024.

Após isso, o programa Motive foi baixado. O Motive é uma plataforma que oferece soluções para rastreamento de imagem, permitindo capturar e processar dados com 6 graus de liberdade. Ele também oferece interfaces para que o usuário possa calibrar e configurar o sistema conforme suas necessidades. Para que o programa funcione corretamente, é essencial que o Hardware Key, representado na Figura 7 esteja conectado ao computador e que a licença esteja devidamente configurada.

Após a fixação do modelo no suporte no laboratório de Interação Fluido-Estrutura e a disposição dos equipamentos OptiTrack, deu-se início à etapa de calibração. Nessa fase, são avaliadas a posição e a orientação de cada câmera, além de se calcular a quantidade de distorções nas imagens capturadas. Com isso, é possível delimitar a área do experimento e criar um volume de captura 3D no programa Motive. Para o processo de calibração, utiliza-se a ferramenta CW-500, também conhecida como Calibration Wand Kit, ilustrado na Figura 10.

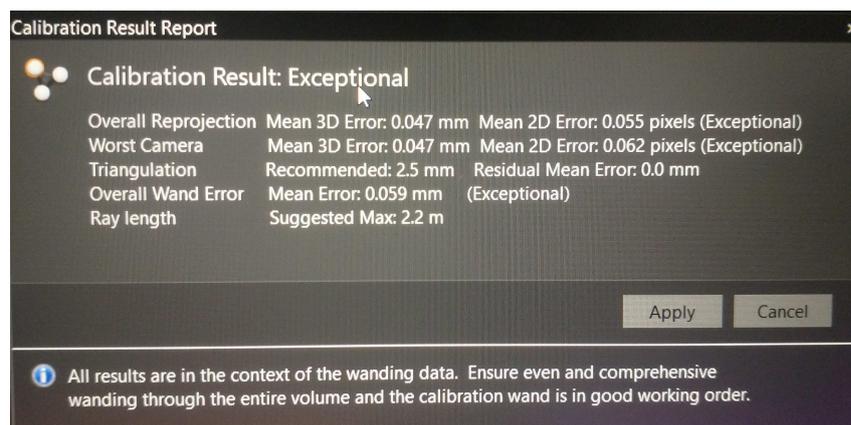
Figura 10 – CW-500 na disposição A



Fonte: Autoral,2024.

A ferramenta recomenda que, em espaços maiores, os três Markers sejam posicionados na orientação A, OptiTrack (2019), conforme mostrado na Figura 10 . A CW-500 foi movida repetidamente pelo ambiente, sendo constantemente acenada em frente às câmeras, que estavam no modo de gravação. É fundamental que o equipamento seja manuseado com movimentos suaves, uniformes e circulares. Foram coletadas mais de mil amostras para cada câmera como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Resultado da calibração



Fonte: Autoral,2024.

Além de ser necessário calibrar as câmeras sempre que suas posições forem alteradas, é recomendável realizar a calibração periodicamente devido a fatores ambientais, como variações de temperatura e umidade, mesmo que as câmeras não tenham sido movidas. A calibração mostrada na figura acima foi uma das várias realizadas para este trabalho, todas classificadas como excepcionais pelo programa

Motive.

Após o programa reconhecer o espaço do ensaio, é indispensável definir as coordenadas e a origem do sistema. O equipamento CS-200, também conhecido como Calibration Square, foi posicionado na bancada de estudo montado no laboratório e alinhado com o engaste do modelo. Essa posição determinará a origem do sistema e as coordenadas no software Motive. É fundamental alinhar o CS-200 com a orientação dos eixos desejada, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Calibration Square



Fonte: Autorial,2024.

O lado mais longo do CS-200 indica a direção do eixo z positivo, enquanto o lado mais curto aponta para o eixo x positivo. Conseqüentemente, o eixo y positivo é direcionado para cima.

3.3 ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Para garantir maior controle e precisão nos resultados, os ensaios experimentais foram realizados em duas etapas distintas. Na primeira etapa, foi analisado um tubo de alumínio, enquanto na segunda, avaliou-se o conjunto formado por uma mangueira hidráulica R5, utilizada como representação de um riser flexível, contendo o tubo de alumínio em seu interior.

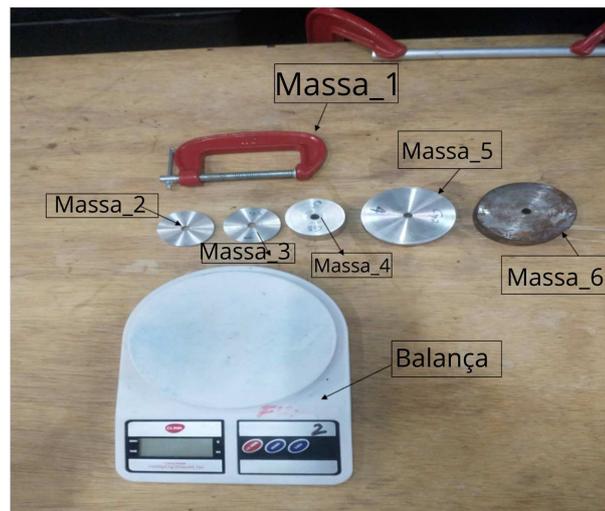
Na primeira etapa, o objetivo foi determinar a rigidez flexional do tubo de alumínio, cuja caracterização foi facilitada pelo conhecimento prévio de seu módulo de elasticidade 69 GPa e pela simplicidade no cálculo de seu momento de inércia. Durante o ensaio, avaliou-se o módulo de elasticidade do tubo, que, combinado com o momento de inércia, permitiu determinar sua rigidez flexional.

Na segunda etapa, os ensaios foram realizados no sistema combinado, composto pela mangueira hidráulica e o tubo de alumínio inserido em seu interior.

Esse procedimento visou caracterizar a rigidez flexional do conjunto, conforme ilustrado na Figura 14.

Os ensaios de deflexão estática foram realizados utilizando quatro diferentes massas, como mostrado na Figura 13. As combinações de massas aplicadas nas extremidades da estrutura estão descritas na Tabela 2.

Figura 13 – Massas utilizadas no ensaio.



Fonte: Autoral, 2024.

Tabela 2 – *Pesos utilizados no ensaio estático*

Ensaio	Peso (N)
1	0,000
2	2,16
3	2,66
4	3,16
5	5,93

Fonte: Autoral, 2024.

Conforme descrito na Tabela 2, o primeiro ensaio foi conduzido sem a aplicação de massa adicional, considerando apenas o peso próprio do modelo. Este modelo poderia ser o tubo de alumínio isolado ou o conjunto mangueira-tubo, como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Mangueira hidráulica preparada para o ensaio.



Fonte: Autoral, 2024.

O ensaio de decaimento foi realizado para determinar a frequência de resposta do sistema no primeiro modo de vibração. Essa frequência foi utilizada no cálculo do módulo de elasticidade dinâmico do sistema. Enquanto o ensaio de deflexão estática utiliza diferentes massas adicionadas na extremidade da estrutura. A cada massa aplicada, a deflexão foi registrada utilizando um sistema de rastreamento por imagem, como exemplificado na Figura 15.

Figura 15 – Registro do ensaio de deflexão estática.



Fonte: Autoral, 2024.

Na Figura 15, observa-se o marcador posicionado na extremidade da estrutura,

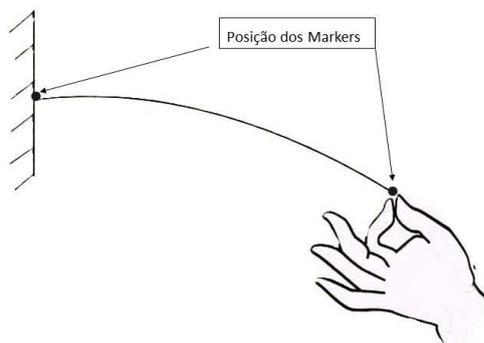
permitindo a obtenção da deflexão máxima causada pela aplicação de cada massa adicional.

3.3.1 Ensaio de Decaimento

Para obter os resultados obtidos experimentalmente foi desenvolvido três códigos distintos no programa Octave, dois deles abordando as Equações 19 e 22, e o outro para obter a frequência dominante do primeiro modo de vibrar através do ensaio de decaimento.

Ao aplicar uma condição inicial de deslocamento, obtém-se o sinal de decaimento, representando a resposta da estrutura a essa excitação inicial. Durante os testes, foi efetuada uma deslocamento inicial no ponto mais próximo da extremidade livre da viga liberando o sistema para oscilar livremente até seu amortecimento total, como demonstra a Figura 16.

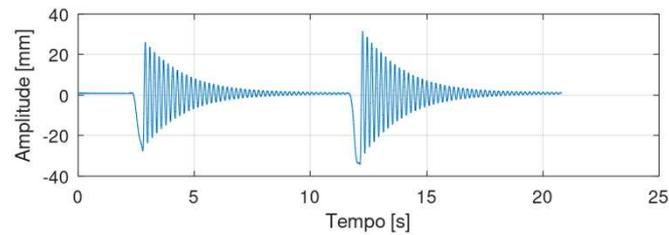
Figura 16 – Deslocamento inicial para obter o decaimento



Fonte: Autoral,2024.

Para evitar interferências, garantiu-se a ausência de forças aerodinâmicas externas, tal ausência refere-se a uma condição em que não há influência significativa de forças geradas pela interação entre um corpo e o fluido ao seu redor (como o ar), de modo que a resposta observada fosse exclusivamente devido à condição dinâmica natural do modelo. Os valores de frequência natural obtidos a partir do ensaio de decaimento foram analisados por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). O sinal obtido é verificado na Figura 17.

Figura 17 – Decaimento da mangueira hidráulica_R5 com o tubo de alumínio

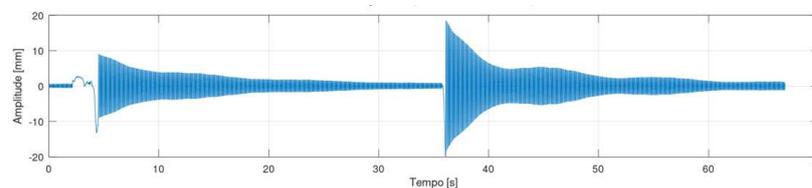


Fonte: Autoral,2024.

Como pode ser analisado na Figura 17, o ensaio constitui em uma condição inicial aplicado duas vezes, ao longo do período de 20 segundos, para uma melhor caracterização do sinal.

O sinal de decaimento do tubo de alumínio é apresentado na Figura 18. Observa-se uma linearidade nos resultados, devido ao tipo de excitação e à sua lenta taxa de amortecimento. Em comparação com a Figura 17, isso indica um comportamento alinhado com as expectativas para futuras análises.

Figura 18 – Decaimento do tubo de Alumínio



Fonte: Autoral,2024.

Após a obtenção da frequência dominante por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), inicia-se a etapa de análise dos dados, seguida de sua comparação com a literatura. Esse processo é fundamental para validar os resultados e assegurar a confiabilidade das conclusões obtidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da análise experimental realizada para determinar a rigidez flexional de uma mangueira flexível, bem como a discussão dos achados com base nas condições do experimento. Os dados experimentais foram coletados por meio da aplicação de cargas controladas e da medição correspondente das deformações da mangueira, permitindo a determinação das suas propriedades elásticas de forma precisa. Os resultados são analisados de maneira crítica, comparando-os com valores teóricos e dados disponíveis na literatura, quando aplicável. Adicionalmente, são discutidos os possíveis fatores que podem ter influenciado os resultados, como variações nas condições de ensaio, características do material da mangueira, e possíveis limitações dos equipamentos ou métodos utilizados. Essa análise visa não apenas interpretar os resultados, mas também fornecer uma compreensão mais ampla sobre o comportamento mecânico da mangueira flexível.

4.1 ANÁLISE DA RIGIDEZ FLEXIONAL PARA O ENSAIO DE DEFLEXÃO ESTÁTICO

Ao utilizar as equações apresentadas na Seção 2.3, foi criada as análises no programa Octave, que visa obter o módulo de elasticidade por meio da deflexão estática. O resultado da média dos ensaios referente ao tubo de alumínio pode ser visualizado na Tabela 3.

Tabela 3 – *Resultado experimental do Módulo de Elasticidade Estático*

Método	Resultado	Unidade	Diferença Percentual
Informado pelo fabricante	69	GPa	-
Estático(alumínio)	65,71	GPa	5 %
Estático(conjunto)	37,93	GPa	-
Estático(mangueira)	27,78	GPa	-

Fonte: Autoral,2024

A diferença entre o valor esperado de 69 GPa, para o módulo de elasticidade encontrado experimentalmente ilustrado na Tabela 3, ocorre devido as hipóteses simplificadoras consideradas pela literatura, como por exemplo: Ao considerar o material homogêneo, espera-se que ele possua as mesmas propriedades em toda sua extensão e que seja isotrópico, exibindo características uniformes em todas as direções — o que pode não ocorrer na prática. A hipótese de ausência de imperfeições ou defeitos também pode ser inviável, pois o processo de fabricação pode introduzir falhas, como o aumento da porosidade. Além disso, ao estabelecer condições ambientais controladas, busca-se garantir a estabilidade da temperatura durante os testes, o que nem sempre é

viável em um ambiente laboratorial padrão. Assim, essas simplificações são adotadas para facilitar a análise, embora se reconheça que as condições ideais assumidas nem sempre correspondem ao comportamento real do material, o que pode justificar a diferença de 5% entre o valor fornecido pelo fabricante e o experimental.

Ao realizar o mesmo ensaio utilizando a mangueira flexível com o tubo de alumínio em seu interior, conforme ilustrado na Figura 14, deve-se considerar o valor do módulo de elasticidade do conjunto. Este valor, apresentado na Tabela 3, resulta da interação mecânica entre dois materiais distintos. Como a mangueira e o alumínio interagem sem a possibilidade de deslocamento relativo entre eles, ambos compartilham as cargas impostas durante o ensaio. No entanto, o alumínio não impede completamente a deformação da mangueira, que é mais flexível, apenas limita sua deformação. Isso resulta em um módulo de elasticidade intermediário, sendo mais rígido que a mangueira sozinha, mas menos rígido que o alumínio isoladamente.

Para determinar o módulo de elasticidade exclusivamente da mangueira flexível, subtrai-se o valor obtido no ensaio do tubo de alumínio isolado do valor obtido no ensaio do sistema do conjunto (mangueira flexível + tubo de alumínio), conforme expresso na Tabela 3.

O valor obtido experimentalmente para o módulo de elasticidade da mangueira flexível reflete a natureza do material, que, por sua vez, é significativamente mais flexível que o alumínio. Esse módulo inferior indica uma resposta mais elástica sob carga, o que já era esperado. Em comparação com o módulo de 65,71 GPa determinado experimentalmente para o alumínio, o valor encontrado de 27,78 GPa confirma a diferença de rigidez entre os materiais, destacando a importância do reforço de alumínio no conjunto (mangueira flexível + alumínio).

Esse resultado é coerente com as expectativas para a função da mangueira em aplicações que demandam tanto flexibilidade quanto resistência mecânica moderada. A análise comparativa entre os materiais cumpriu seu propósito, evidenciando claramente o módulo de elasticidade desejado.

Os valores experimentais de rigidez flexional (EI) foram calculados com base no produto entre o módulo de elasticidade experimental e o momento de inércia de cada modelo ensaiado. Os resultados detalhados para o tubo de alumínio, o conjunto formado pela mangueira flexível com o tubo de alumínio inserido, e a mangueira isolada são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – *Rigidez Flexional experimental*

Método	Resultado	Unidade
Informado pelo fabricante	64,37	$N \cdot m^2$
Estático(alumínio)	61,30	$N \cdot m^2$
Estático(conjunto)	99,17	$N \cdot m^2$
Estático(mangueira)	37.87	$N \cdot m^2$

Fonte: Autoral,2024

No caso do tubo de alumínio isolado, o valor experimental obtido foi $61.30 N \cdot m^2$, próximo ao valor informado pelo fabricante esperado de $64.37 N \cdot m^2$. A pequena diferença de aproximadamente 4.8% está alinhada com as discussões previamente realizadas sobre o módulo de elasticidade. Esse desvio pode ser atribuído às simplificações adotadas, como a suposição de homogeneidade e ausência de imperfeições no material.

No caso do conjunto (mangueira + tubo de alumínio), observou-se um aumento significativo na rigidez flexional, atingindo $99.17 N \cdot m^2$. Esse comportamento é justificado pela contribuição da mangueira flexível, que aumenta o momento de inércia do sistema. A configuração geométrica do conjunto resulta em uma maior distribuição de material em torno do eixo neutro, fator determinante para o aumento da rigidez flexional total.

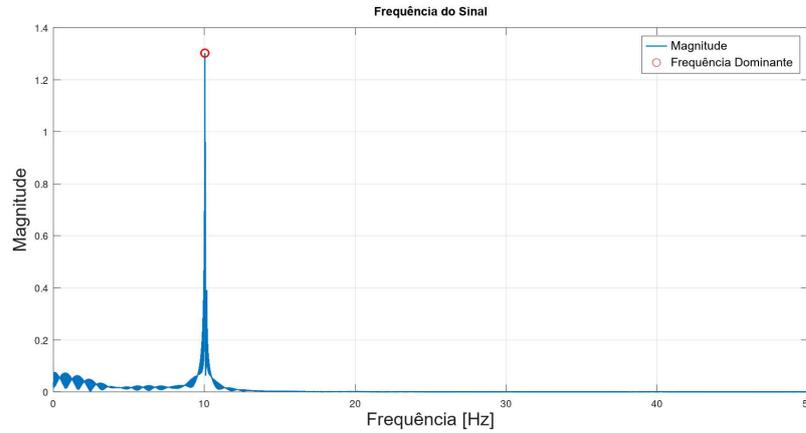
Por outro lado, para a mangueira isolada, o valor experimental de rigidez flexional foi $37.87 N \cdot m^2$, evidenciando a menor contribuição desse componente ao comportamento combinado. Essa limitação está diretamente associada ao módulo de elasticidade reduzido da mangueira em comparação ao alumínio, além do seu momento de inércia.

Esses resultados destacam a relevância de considerar tanto as propriedades intrínsecas do material quanto as características geométricas na análise da rigidez flexional. A combinação dos dois componentes — mangueira e tubo de alumínio — foi capaz de melhorar significativamente o desempenho mecânico do sistema. Dessa forma, o estudo experimental fornece uma base sólida para validação de modelos teóricos e para aplicações práticas, como a simulação de risers flexíveis, contribuindo para o avanço no entendimento de suas propriedades estruturais.

4.2 ANÁLISE DA RIGIDEZ FLEXIONAL ATRAVÉS DO ENSAIO DE DECAIMENTO

Para a análise do módulo de elasticidade dinâmico, é preciso realizar uma análise de decaimento e, em seguida, aplicar a FFT desenvolvida no programa Octave para determinar a frequência dominante do ensaio. Tal valor pode ser verificado na Figura 19

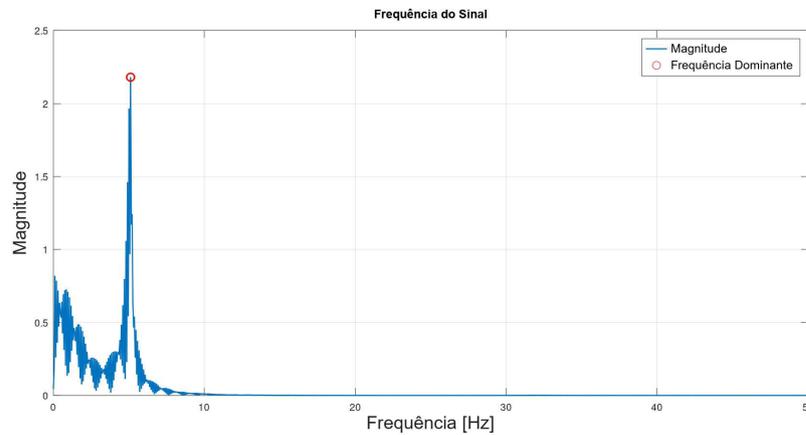
Figura 19 – Frequência Dominante do decaimento do tubo de alumínio



Fonte: Autoral,2024.

A frequência de excitação extraída do ensaio de decaimento é $10,03 \text{ Hz}$. O mesmo procedimento é realizado para extrair a frequência dominante do conjunto (mangueira flexível + tubo de alumínio). Tal frequência é expressa na Figura 20, sendo encontrado um valor de $5,11 \text{ Hz}$.

Figura 20 – Frequência Dominante do decaimento do conjunto (mangueira + alumínio)



Fonte: Autoral,2024.

Ao utilizar a Equação 22 chega-se ao resultado expresso na Tabela 5.

Tabela 5 – *Resultado experimental do Módulo de Elasticidade Dinâmico*

Método	Resultado	Unidade	Diferença Percentual
Informado pelo fabricante	69	GPa	-
Dinâmico(tubo de alumínio)	68,64	GPa	0,51%
Dinâmico(conjunto)	32,77	GPa	-
Dinâmico(mangueira)	35,87	GPa	-

Fonte: Autoral,2024

Ao obter o resultado de 68,64 GPa, ligeiramente maior que o obtido de forma estática, gerando um fator de erro de 0,517% quando comparado ao valor fornecido pelo fornecedor, tal fato ocorre pois as frequências envolvidas influenciam o comportamento do material, e alguns fatores que explicam a diferença entre os métodos dinâmico e estático incluem:

Taxas de carga que geram diferentes deformações: Como o ensaio dinâmico envolve a aplicação rápida de força, a deformação ocorre em alta frequência, o que gera uma resposta distinta em relação ao ensaio estático, onde a carga é aplicada lentamente. Em altas taxas de carga, os materiais tendem a oferecer maior resistência à deformação devido a efeitos de viscosidade e inércia interna.

Dissipação de energia: No ensaio dinâmico, parte da energia é dissipada e absorvida como calor dentro do material, alterando a resposta elástica. **Frequência de carga:** Conforme a frequência aumenta, o material tende a responder de forma mais rígida, pois os elementos internos não têm tempo de se reorganizar em resposta à carga aplicada.

Outro ponto que deve ser levado em consideração nas análises é que a frequência determinada de forma experimental pelo decaimento pode conter a presença de amortecimento no sistema o que reduz a frequência encontrada, o que impacta de forma direta no cálculo do módulo de elasticidade, uma vez que a frequência é utilizada ao quadrado na sua formulação.

Após determinar o módulo de elasticidade, seu valor deve ser multiplicado pelo momento de inércia do sistema, considerando tanto a análise do tubo de alumínio isolado quanto do conjunto formado pela mangueira hidráulica com o tubo de alumínio em seu interior. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – *Rigidez Flexional experimental*

Método	Resultado	Unidade
Informado pelo fabricante	64,37	N · m ²
Dinâmico(alumínio)	64,03	N · m ²
Dinâmico(conjunto)	85,70	N · m ²
Dinâmico(mangueira)	21,27	N · m ²

Fonte: Autoral,2024

Para o tubo de alumínio isolado, o valor experimental da rigidez flexional foi de $64,03 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, muito próximo do valor informado pelo fabricante de $64,37 \text{ N} \cdot \text{m}^2$. Esse resultado apresentou um desvio de apenas $0,5\%$, demonstrando a previsibilidade do comportamento estrutural do tubo de alumínio.

No caso do conjunto formado pela mangueira e o tubo de alumínio, a rigidez flexional foi de $85,70 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, representando um aumento significativo. Esse comportamento pode ser atribuído à contribuição geométrica da mangueira, que resulta em uma maior distribuição de material em torno do eixo neutro, aumentando a inércia do sistema.

O valor obtido para o conjunto mangueira e tubo de alumínio no ensaio dinâmico foi significativamente menor em comparação ao ensaio estático. Esse resultado pode ser atribuído a diversos fatores que influenciam o módulo de elasticidade medido, como a possibilidade de perda de contato no acoplamento do conjunto durante as excitações necessárias para determinar a frequência natural. Essa perda de contato pode comprometer a transmissão uniforme das forças, afetando diretamente os resultados dinâmicos.

Por outro lado, para a mangueira isolada, a rigidez flexional foi de $21,27 \text{ N} \cdot \text{m}^2$. Esse valor é coerente com suas propriedades, como o menor módulo de elasticidade e a menor resistência à deformação em comparação ao tubo de alumínio.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho demonstraram a relevância de considerar tanto as propriedades materiais quanto as características geométricas na análise de sistemas estruturais compostos. A partir das análises estáticas e dinâmicas realizadas, foi possível avaliar as propriedades de rigidez flexional de diferentes configurações, fornecendo informações fundamentais para a validação de modelos teóricos e para aplicações práticas.

Para o tubo de alumínio isolado, os valores experimentais de rigidez flexional e módulo de elasticidade apresentaram excelente concordância com os valores analíticos, com desvios inferiores a 0,5%. Esse resultado evidencia a previsibilidade do comportamento estrutural do material e a eficiência do método experimental utilizado.

No conjunto formado pela mangueira e o tubo de alumínio, foi observado um aumento significativo na rigidez flexional, atribuído à contribuição geométrica da mangueira, que aumenta o momento de inércia do sistema. Esse comportamento reforça a importância de combinar materiais e geometria de maneira estratégica para otimizar o desempenho estrutural.

No entanto, os resultados obtidos para o ensaio dinâmico do conjunto foram inferiores aos do ensaio estático. Essa diferença pode ser explicada por fatores como a possível perda de contato entre os componentes durante as excitações dinâmicas, o amortecimento presente no sistema, e os efeitos das altas taxas de carregamento, que influenciam a resposta do material. Além disso, a frequência dominante do sistema é diretamente utilizada no cálculo do módulo de elasticidade, o que amplifica qualquer desvio ou incerteza nas medições.

Para a mangueira isolada, os valores de rigidez flexional confirmaram sua menor contribuição ao comportamento combinado, devido ao seu menor módulo de elasticidade e resistência à deformação. Esses resultados destacam o papel complementar da mangueira no sistema, indicando que sua principal contribuição está na modificação da inércia total do conjunto.

Em suma, o estudo confirmou a eficácia das metodologias experimentais empregadas e forneceu uma base sólida para o desenvolvimento de modelos teóricos mais robustos, especialmente para aplicações em risers flexíveis e outras estruturas compostas. Os resultados obtidos também ressaltam a importância de investigar a interação entre materiais e geometrias em contextos dinâmicos e estáticos, abrindo caminho para futuras pesquisas e avanços tecnológicos no campo da engenharia estrutural.

A fim de aprimorar os resultados obtidos e aumentar a confiabilidade das

análises, algumas melhorias podem ser implementadas em trabalhos futuros: Para o ensaio estático: Aumentar o número de massas testadas e realizar medições com repetições de pelo menos 10 vezes para cada carga. Isso permitirá a utilização da incerteza padrão do tipo A, proporcionando uma análise mais robusta para ambos os materiais.

Já para ensaios dinâmicos: Fixar as estruturas da mangueira e do tubo de alumínio com o uso de adesivos adequados (como colas específicas) para minimizar os possíveis efeitos de interação entre os materiais, reduzindo a influência de desacoplamentos na resposta dinâmica. Utilizar um shaker para gerar frequências controladas, permitindo uma análise mais precisa e comparativa dos módulos de elasticidade dinâmicos em diferentes frequências, realizar ensaios complementares para determinar os módulos de elasticidade dinâmicos transversal e longitudinal. Essa abordagem permitirá verificar se os valores obtidos para diferentes formas de caracterização são equivalentes, como indicado pela literatura.

Estas propostas visam ampliar a abrangência dos resultados experimentais e reduzir possíveis incertezas associadas ao processo de medição e análise. Além disso, a realização de ensaios adicionais permitirá explorar com mais detalhes os comportamentos mecânicos dos materiais, contribuindo para validar os modelos teóricos e reforçar as conclusões obtidas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA.S.F. **Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura.** 2005. Dissertação (Dissertação) — Escola de engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2005.
- API.17B. **Recommended Practice for Flexible Pipe.** 2. ed. New York: American Petroleum Institute, 1998.
- ARAUJO, L. d. **Introdução à avaliação e expressão de incerteza em medições.** Campinas: Instituto de Física “Gleb Wataghin” Universidade Estadual de Campinas, 2017.
- BAUCHAUZ O; CRAIG, J. **Structural Analysis: With Applications to Aerospace Structures.** [S.l.]: Springer Netherlands, 2009.
- BELENDEZ T.; NEIPP, C. **A. Large and small deflections of a cantilever beam.** [S.l.]: European journal of physics, 2002.
- DIOGENES, H. J. F. et al. **Determination of modulus of elasticity of concrete from the acoustic response.** 4. ed. [S.l.]: Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2011.
- FUJARRA, A. C. **Vibrações lineares.** Joinville, 2015.
- GERE, J. M. **Mechanics of Materials.** 1. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2004.
- KREVELEN, D. **Properties of Polymers.** 3. ed. New York: Elsevier, 1990.
- MILANEZ, M. **AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL REMANESCENTE ATRAVÉS DE NOVA ABORDAGEM PARA ANÁLISE DO DANO POR FADIGA EM RISERS FLEXÍVEIS.** 2018. Dissertação (Obtenção do Título de de Mestre em Engenharia Oceânica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- MORTON-JONES, D. **Polymer processing.** London: ChapmanHall, 1989.
- OPTITRACK. **OptiTrack Documentation.** 2019. — Disponível em:<https://docs.optitrack.com/motive/calibration/continuous-calibration>. Acesso em 12 de outubro de 2024, 2019.
- ORNELLAS, N. **Análise do comportamento dinâmico de um riser para seu dimensionamento.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Petróleo) — Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.
- PESSAN L. A; HAGE JR, E. **Correlação entre processamento, estrutura e propriedades dos polímeros, Aperfeiçoamento em tecnologia de plásticos.** 2002. Dissertação — UFSCar, 2002.
- RABELO, M. **Estudo experimental do comportamento estrutural de barras curvas.** 2009. Dissertação(Mestrado em Engenharia) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

RAO, S. S. **Mechanical vibrations**. 6. ed. Miami: Pearson Education:Inc, 2018.

ROSS, C. . et al. **Strength of Materials and Structures**. [S.I.]: Elsevier Science, 1999.

WARD, I. M. et al. **An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers**. 2. ed. Chichester: John Wiley Sons, 2004.