

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARCELO DE ÁVILA BARRETO

**RIGIDEZ DE LINHAS HÍBRIDAS PARA ANCORAGEM *OFFSHORE* POR MEIO
DE VISÃO COMPUTACIONAL
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

RIO GRANDE, RS
2025

MARCELO DE ÁVILA BARRETO

**RIGIDEZ DE LINHAS HÍBRIDAS PARA ANCORAGEM *OFFSHORE* POR MEIO
DE VISÃO COMPUTACIONAL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica” – Área de Concentração: Engenharia de Fabricação
Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Marcos Guilherme.

RIO GRANDE, RS

2025

B273r

Barreto, Marcelo de Ávila

Rigidez de linhas híbridas para ancoragem *offshore* por meio de visão computacional / Marcelo de Ávila Barreto. – 2025.

75 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.

Orientador: Dr. Carlos Eduardo Marcos Guilherme.

1. Engenharia Mecânica. 2. Fibras artificiais. 3. Visão computacional. 4. Amarração. 5. Ancoragem. I. Guilherme, Carlos Eduardo Marcos. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPGEMec



+-----Ata nº **11/2025** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e sete dias do mês de agosto de dois mil e vinte e cinco, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às nove horas, no Laboratório de Análise de Tensões no Campus Carreiros desta Universidade, a que se submeteu o discente **MARCELO DE AVILA BARRETO**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a linha de pesquisa de Materiais, com o seguinte título: **RIGIDEZ DE LINHAS HÍBRIDAS PARA ANCORAGEM OFFSHORE POR MEIO DE VISÃO COMPUTACIONAL**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Carlos Eduardo Marcos Guilherme, Kleber Eduardo Bianchi e a convidada Amanda Dantas de Oliveira sob a presidência do Professor Carlos Eduardo Marcos Guilherme. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Carlos Eduardo Marcos Guilherme: APROVADO
2. Kleber Eduardo Bianchi: APROVADO
3. Amanda Dantas de Oliveira: APROVADO

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:



Documento assinado digitalmente
CARLOS EDUARDO MARCOS GUILHERME
Data: 28/08/2025 17:04:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

1.

CPF: 732.846.700-25



Documento assinado digitalmente
KLEBER EDUARDO BIANCHI
Data: 29/08/2025 08:22:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

2.

CPF: 440.783.230-49



Documento assinado digitalmente
AMANDA DANTAS DE OLIVEIRA
Data: 28/08/2025 17:08:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

3.

CPF: 012.372.664-67



Documento assinado digitalmente
MARCELO DE AVILA BARRETO
Data: 01/09/2025 14:28:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Marcelo de Avila Barreto: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Marcos Guilherme
Universidade Federal do Rio Grande – FURG

Prof.^a Dr.^a Amanda Dantas de Oliveira
Universidade Federal de Pelotas – UFPel

Prof. Dr. Kleber Eduardo Bianchi
Universidade Federal do Rio Grande – FURG

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, Jorge, Gladis, Gabriel, Júlia e Guilherme, pelo papel fundamental de apoio e carinho que têm na minha vida.

Agradeço a Tecnofibers, em especial à Larissa Zangalli e ao Daniel da Cruz, por todos os anos de apoio sem os quais não seria possível a execução desse trabalho.

Agradeço meu orientador, Prof. Carlos Guilherme, por todos os anos de ensinamentos e parceria.

Agradeço também ao Laboratório de Análise de Tensões (POLICAB FURG) por possibilitar um espaço técnico-científico no qual esse trabalho foi desenvolvido.

RESUMO

A dissertação analisa o comportamento mecânico de linhas de amarração híbridas compostas por fibras sintéticas de PET e de HMPE associadas em série, com foco na rigidez sob carregamentos quase-estáticos e dinâmicos. O estudo propõe o uso de visão computacional como alternativa à medição tradicional de deslocamentos em ensaios mecânicos, empregando as bibliotecas YOLO e OpenCV para rastrear deformações por meio do vídeo. A motivação vem da crescente demanda por sistemas de amarração mais leves e eficientes para plataformas *offshore*, como FPSOs e turbinas eólicas flutuantes. As fibras sintéticas, por oferecerem alta resistência e baixo peso, surgem como alternativa promissora aos cabos de aço, embora apresentem comportamento não linear e sensível ao histórico de carga. Foram construídos corpos de prova com diferentes proporções de PET e HMPE em série ligados por um elo metálico, e aplicados testes conforme a norma ISO 18692. Os vídeos foram analisados por um código em Python que estimou os alongamentos individuais dos segmentos. A validação do método mostrou alta correlação com os dados obtidos por máquina ($r > 0,99$ nos testes preliminares), embora o desempenho diminua com ensaios mais longos. Os resultados indicam a proporção dos materiais de compõem a linha híbrida em série influenciam na resposta de rigidez total da linha, sendo possível múltiplas rigidezes resultantes com apenas duas fibras. A visão computacional demonstrou ser uma ferramenta acessível e eficaz para medição de deformações, especialmente em casos de maiores deslocamentos.

Palavras-chave: Rigidez. Fibras sintéticas. Visão computacional; Linha de amarração híbrida.

ABSTRACT

The dissertation analyzes the mechanical behavior of hybrid mooring lines composed of PET and HMPE synthetic fibers arranged in series, focusing on stiffness under quasi-static and dynamic loading. The study proposes the use of computer vision as an alternative to traditional displacement measurement in mechanical tests, employing YOLO and OpenCV libraries to track deformations through video analysis. The motivation stems from the growing demand for lighter and more efficient mooring systems for offshore platforms, such as FPSOs and floating wind turbines. Synthetic fibers offer high strength and low weight, making them a promising alternative to steel cables, although their behavior is nonlinear and sensitive to load history. Specimens with varying proportions of PET and HMPE were tested according to ISO 18692. Videos of the tests were analyzed using a custom Python code that estimated individual segment elongations. Method validation showed high correlation with machine-obtained data ($r > 0.99$ in preliminary tests), although performance decreases in longer tests. Results indicate that the stiffness of the hybrid line varies with the material ratio, making it possible to tune mechanical behavior without developing new fiber compounds. Computer vision proved to be an accessible and effective tool for measuring deformations, especially in scenarios with larger displacements.

Keywords: Stiffness. Synthetic fibers. Computer vision. Hybrid mooring lines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema dos sistemas de ancoragem:	16
Figura 2.2 – Diferentes configuração de amarração de estruturas oceânicas.....	18
Figura 2.3 – Características construtivas dos cabos navais.....	19
Figura 2.4 – Esquema de construção dos cabos navais.	20
Figura 2.5 – Fluência e relaxação de um material viscoelástico.....	21
Figura 2.6 – Configuração do ensaio de abração <i>Yarn-on-Yarn</i>	23
Figura 2.7 – Processamento por DIC.	28
Figura 2.8 – Aplicação do YOLO.....	29
Figura 3.1 – Fluxograma metodológico.	31
Figura 3.2 – Corpo de prova híbrido com dois materiais associados em série.....	32
Figura 3.3 – Imagem esquemática do corpo de prova híbrido.....	33
Figura 3.4 – Bobina de HMPE e máquina <i>Instron Electropuls E3000</i>	33
Figura 3.5 – Demonstrativos das placas de pare fixas ao ensaio mecânico.	34
Figura 3.6 - Exemplo de localização das box e aplicação das identificações (ID). 35	
Figura 3.7 – Fluxograma de processamento do código de visão computacional. .	36
Figura 3.8 – Gráfico de flutuação da carga aplicada.	37
Figura 3.9 – Representação gráfica dos testes de rigidez.....	41
Figura 3.10 – Ambiente de ensaio com filmagem.....	44
Figura 4.1 – Avanço do <i>tracking</i> ao longo do ensaio.....	45
Figura 4.2 – Deslocamentos obtidos pela <i>Instron</i> e pelo YOLO.....	46
Figura 4.3 – Alongamentos Total e do PET – Condição 30% HMPE e 70% PET. 48	
Figura 4.4 – Alongamentos total e do PET – Condição 40% HMPE e 60% PET. .	49
Figura 4.5 – Alongamento total e do PET – Condição 50% HMPE e 50% PET.	49
Figura 4.6 – Alongamento total e do PET – Condição 60% HMPE e 40% PET.	49
Figura 4.7 – Alongamento total e do PET – Condição 70% HMPE e 30% PET.	50
Figura 4.8 – Deformação média do PET e do HMPE para todos as condições.	51
Figura 4.9 – Deformação total das amostras híbridas.	51
Figura 4.10 – Deslocamentos para as condições simples.....	53
Figura 4.11 – Deslocamentos para as condições híbridas.	53
Figura 4.12 – Comparação entre experimental e YOLO para rigidez quase-estática.	55
Figura 4.13 – Comparação entre experimental e YOLO para rigidez dinâmica.....	56

Figura 4.14 – Erro relativo para as condições híbridas.	57
Figura 4.15 – Rigidez experimental das linhas simples e híbridas.	58
Figura 4.16 – Rigidez YOLO das linhas simples e híbridas.....	59
Figura 4.17 – Rigidez individual do PET por meio do YOLO.....	60
Figura 4.18 – Rigidez individual do HMPE por meio do YOLO.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resumo de propriedades do PET e do HMPE.	32
Tabela 3.2 – Descrição do teste preliminar.	38
Tabela 3.3 – Descrição dos testes de rigidez.	42
Tabela 4.1 – Resumo das métricas estatísticas calculadas para as curvas.	47
Tabela 4.2 – Métricas estatísticas aplicadas aos ensaios principais.	54

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	<i>American Bureau Shipping</i>
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials</i>
CI	<i>Cordage Instituto</i>
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
DS	<i>Dinamic Stiffness</i>
FOWT	<i>Floating Offshore Wind Turbine</i>
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading</i>
HD	<i>High Definition</i>
HMPE	<i>High Modulus Polyethylene</i>
ID	<i>Identificação</i>
ISO	<i>International Standard Organization</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MBS	<i>Mean Breaking Strength</i>
OPENCV	<i>Open Computer Vision</i>
PET	<i>Polietileno Tereftalato</i>
QSS	<i>Quasistatic Stiffness</i>
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
TLP	<i>Tension Leg Platform</i>
YBL	<i>Yarn Breaking Load</i>
YOLO	<i>You Only Look Once</i>
YOY	<i>Yarn-on-Yarn</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Objetivos.....	13
1.2. Estrutura do trabalho	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1. Aspectos gerais da utilização de cordas de amarração <i>offshore</i>	15
2.2. Normas e procedimentos de ensaios para cabos e multifilamentos.....	22
2.3. Tecnologia dos materiais sintéticos para confecção de cabos	24
2.4. Uso de imagem como instrumentação de ensaios mecânicos	27
2.5. Tecnologia da visão computacional por meio do YOLO	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1. Construção do corpo de prova	31
3.2. Construção do código de visão computacional	34
3.3. Ensaios mecânicos preliminares para validação do código.....	37
3.4. Processo de validação do código de visão computacional.....	38
3.5. Protocolo de rigidez adaptado para avaliação das linhas híbridas	40
3.6. Características do processamento do vídeo.....	43
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	45
4.1. Resultados preliminares da validação do código de visão computacional	45
4.2. Leituras de alongamento do teste de rigidez por visão computacional	48
4.3. Segunda etapa de validação da visão computacional.....	52
4.4. Resultado geral de rigidez da linha híbrida.....	57
4.5. Resultados de rigidez dos componentes da linha híbrida.....	60
5. CONCLUSÕES	62
6. SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS	65
REFERÊNCIAS.....	66
a. Referências nominais:.....	66
b. Referências por estrato	70
c. Referências por Qualis.....	71
d. Referências por data dos artigos	71
APÊNDICE	72

1. INTRODUÇÃO

Amarrar estruturas e equipamentos navais é uma preocupação antiga da Engenharia, visto que a navegação marítima fez parte de grandes marcos da História mundial. Apesar da presença histórica, esses sistemas evoluíram e tornaram-se mais complexos com a necessidade de explorar recursos naturais presentes no solo oceânico, tais como petróleo e gás (Monteiro et al., 2021).

Um sistema de amarração tem a finalidade de manter estacionada uma estrutura flutuante considerando os esforços provenientes do ambiente e propiciar a execução de atividades industriais em alto mar – indústria *offshore*. As atividades mais comuns são a perfuração de poços, a produção e estocagem de óleo e gás, descarga para embarcações de transporte e, mais recente, a geração de energia eólica em alto mar, conhecida como *Floating Offshore Wind Turbines* – FOWT (Ma et al., 2019).

Desse modo, tanto o desenvolvimento de sistemas de ancoragem e amarração mais robustos, quanto a utilização de materiais de maior tecnologia surgem junto à expansão da prospecção de petróleo em leito marinho. Nesse contexto, as plataformas flutuantes são destinadas não somente à prospecção, mas também à logística de transporte e ao armazenamento de petróleo, como as *Floating Production Storage and Offloading* – FPSO (Ma et al., 2019).

Segundo Moraes e Caetano Filho (2013), no início dos anos 2000 houve um grande avanço na produção de óleo e gás em alto mar. Ao longo deste período têm sido utilizados, principalmente, quatro tipos distintos de estruturas flutuantes para suprir a necessidade de exploração de poços em maiores profundidades. Como exemplo, as plataformas: de pernas atirantadas (*tension leg platform* – TLP); semisubmersíveis; *spar* e; FPSO. Surge em paralelo, também, o desenvolvimento de sistemas de amarração mais apropriados às novas demandas, em especial o *Taut-Leg* que, entre outras características, distingue-se da catenária convencional ao ocupar menos espaço do solo oceânico (Ma et al., 2019).

Outro aspecto importante ao desenvolvimento dos sistemas de amarração é a utilização de fibras sintéticas em contraste aos cabos de aço já disseminados na indústria. Sendo a relação entre o peso próprio e a resistência mecânica, o principal ganho dos cabos de amarração feitos utilizando essas fibras. Nesse contexto, Dell Vecchio (1992) investigou as características do polietileno tereftalato (PET) na

construção de cabos de amarração e observou que se trata de um material muito oportuno à ancoragem em águas profundas.

Desse modo, o escopo deste trabalho é a possibilidade de utilização de materiais sintéticos distintos associados em série na construção de uma linha de amarração híbrida. Dessa forma é possível obter características mecânicas variadas, como alongamento e rigidez, sem a necessidade do desenvolvimento de fibras sintéticas específicas que atenda essas características mecânicas.

Analisar como se comporta a rigidez de cada um dos materiais quando submetidos juntos a um mesmo carregamento é fundamental, visto que a rigidez de materiais sintéticos é não-linear e dependente do nível de carga, histórico de carregamentos e da velocidade de aplicação da carga (Tsobkallo et al., 2001). As partes amorfas e cristalinas presentes nas fibras respondem de forma distinta aos esforços aplicados, o que torna a previsão de seu comportamento complexa (Koloor et al. 2021).

Existem, com isso, diferentes modelos para quantificar a evolução da rigidez dos materiais. Desse modo, as certificadoras postulam modelos para teste de rigidez, dentre os quais destaca-se a recomendação da *American Bureau of Shipping* (2021) para análise utilizando uma curva de rigidez bi-linear. Essa recomendação vai ao encontro do teste padronizado pela norma ISO 18692 (2007).

Outra característica relevante deste trabalho, é a utilização de visão computacional para leitura de deformação nos ensaios mecânicos híbridos. Como a máquina padrão (máquina *Instron Electropuls E3000*) para testes apresenta apenas uma leitura de deslocamento total, é necessário, no mínimo, mais uma leitura de deslocamento para estabelecer as parcelas de deformação de cada material quando associados em série. Para esse fim, utiliza-se a visão computacional, no qual os deslocamentos são obtidos a partir de um vídeo da performance do teste.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral analisar o comportamento mecânico de uma linha de amarração híbrida em série de Polietileno Tereftalato (PET) e Polietileno de Alto Módulo (HMPE) por meio de teste de rigidez e utilizar visão

computacional como método de leitura dos alongamentos totais e parciais do corpo de prova híbrido.

Como objetivos específicos desse trabalho são identificados os seguintes:

- Revisar os sistemas de amarração e os métodos de análises desses sistemas;
- Desenvolver um código para processamento dos vídeos dos ensaios mecânicos como o intuito de adquirir os deslocamentos;
- Validar o código de aquisição de deslocamentos por visão computacional utilizando a leitura da máquina de ensaios;
- Avaliar a rigidez de linhas híbridas com diferentes proporções de PET e HMPE em seu comprimento.

1.2. Estrutura do trabalho

Este trabalho subdivide a fundamentação teórica em três eixos principais: a revisão de conceitos fundamentais da amarração de estruturas *offshore*; a tecnologia de materiais sintéticos para cabos de amarração; e a tecnologia de visão computacional aplicada a ensaios mecânicos.

Além disso, a metodologia abrange a caracterização mecânica das fibras, a realização dos protocolos estáticos e dinâmicos filmados para corpos de prova simples e híbridos, a elaboração e calibração do código de visão computacional para leitura dos deslocamentos e a execução dos modelos de teste de rigidez. Dessa forma, busca-se analisar não apenas a efetividade da leitura por visão computacional, mas, sobretudo, a evolução da rigidez do PET e do HMPE, tanto quando suportam sozinhos como quando associados em série aos esforços mecânicos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fim de abranger os tópicos fundamentais que subsidiam os objetivos do trabalho, inicialmente, são revisados os principais conceitos e definições da utilização de cordas de amarração offshore. Isso tem como função entender as características desses elementos estruturais. Após, apresenta-se as propriedades e características dos cabos sintéticos, bem como o estado da arte da tecnologia dos materiais empregados em sua fabricação. Por fim, revisa-se a utilização de análise por imagem como instrumentação de ensaios mecânicos, para com isso observar as vantagens e as limitações da aplicação desses métodos.

Esse trabalho junta duas abordagens pouco investigadas: as linhas de amarração híbridas e a visão computacional como instrumentação de ensaios mecânicos. Dessa forma, visa a elucidar as características de uma linha de amarração híbrida de materiais distintos, associados em série. Em paralelo, aplicar métodos de visão computacional para leituras das diferentes deformações presentes nas amostras híbridas.

2.1. Aspectos gerais da utilização de cordas de amarração *offshore*

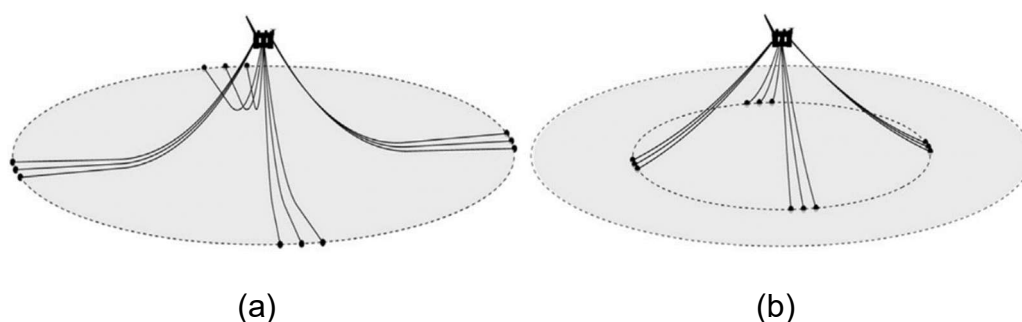
Os sistemas de amarração são elementos críticos para a estabilidade e a operação segura de unidades flutuantes *offshore*, como plataformas de produção, navios-tanque e sistemas de energias renováveis (Ma et al. 2019). Em função das condições ambientais, da profundidade da lâmina d'água e do tipo de estrutura ancorada, diferentes configurações geométricas e materiais de linha são empregados. Entre as principais opções, destacam-se os arranjos do tipo catenária, *taut-leg* e híbrido, cada qual com vantagens específicas quanto à resposta dinâmica, custo de instalação e manutenção (Paik, 2022).

Inicialmente, é necessário diferenciar os dois tipos mais utilizados de arranjo para a amarração: a catenária e o *taut-leg*. A linha de amarração catenária recebe esse nome por apresentar uma curvatura, devido ao seu próprio peso, semelhante as catenárias matemáticas. Esse tipo de configuração é amplamente aplicado em lâminas d'água rasas a intermediárias, sendo composto geralmente por correntes ou cabos de aço de elevada densidade. Na linha catenária a maior parte da força

de restabelecimento horizontal resulta do peso da própria linha apoiada no leito marinho, e não da sua rigidez axial (Ma et al. 2019).

Esse sistema proporciona boa absorção de esforços dinâmicos e simplicidade de instalação, porém requer áreas maiores de ocupação no mar. Além disso, apresenta desempenho limitado em grandes profundidades, no qual o peso excessivo compromete sua eficiência estrutural e econômica (Ma et al. 2019). Apresenta-se uma imagem representativa do sistema convencional (catenária) na Figura 2.1(a).

Figura 2.1 - Esquema dos sistemas de ancoragem:



FONTE: Ma et al. (2019).

Outra configuração muito utilizada na amarração de estruturas flutuantes é o *taut-leg*, esquematizada na Figura 2.1(b). Essa configuração é caracterizada por cabos mantidos tensionados em um ângulo acentuado com o fundo marinho – geralmente entre 30° e 60° . Diferentemente das linhas catenárias, o sistema *taut-leg* utiliza a rigidez axial da linha para resistir aos deslocamentos da unidade flutuante, proporciona maior força de restabelecimento e ocupa um menor espaço do leito marinho para sua fixação. Essa configuração é especialmente adequada para água profundas e ultra profundas, e utiliza cabos sintéticos de alta resistência e baixa densidade, como o poliéster ou o HMPE. As principais vantagens incluem menor *footprint* (espaço do solo marinho ocupado), resposta dinâmica mais previsível e compatibilidade com sistemas de produção flexíveis (Ma et al. 2019).

No estudo comparativo de Wang et al. (2013), foram avaliados os dois tipos de sistemas de amarração para um novo conceito de FPSO, com um foco na performance em águas rasas. Os resultados indicaram que, para essa aplicação específica, o sistema de amarração do tipo *taut-leg* é mais eficaz em termos de deslocamento da plataforma e agrega vantagens operacionais à instalação. De

acordo com os autores, a catenária perde eficiência ao passo que é dependente do peso da linha para garantir a estabilidade da estrutura flutuante. Essa característica exige linhas de amarração longas, o que aumenta significativamente o risco de colisões com outras embarcações e equipamentos subaquáticos. Já o sistema *taut-leg* proporciona uma ótima relação resistência/peso, enquanto apresenta uma menor área ocupada e uma maior força de restauração horizontal.

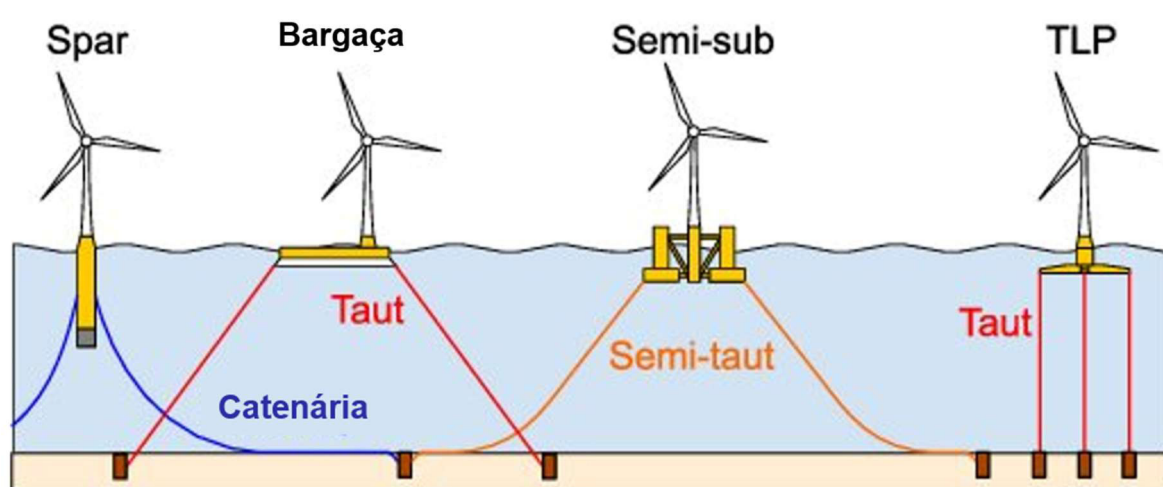
Observa-se, portanto, que é possível estabelecer alta correlação entre a configuração escolhida e os parâmetros de desempenho das estruturas flutuantes, como resposta hidrodinâmica, amplitude de deslocamentos e passo da plataforma, por exemplo. O sistema de amarração de cabos tensionados (*taut-leg*) oferece maior estabilidade sob os efeitos combinados do vento, das ondas e da corrente, o que é crucial para a sua integridade estrutural. Isso vai ao encontro do trabalho de Zhu et al. (2021), que utilizaram o modelo hidrodinâmico de corpo flutuante OC4 (*Offshore Code Comparion Collaboration Continuation*) para simular o comportamento das estruturas sob diferentes condições ambientais e comparar as respostas dinâmicas para ambos os sistemas – catenária e *taut-leg*. Os resultados que obtiveram reiteram que os sistemas de cabos tensionados apresentam maior eficiência global em comparação à catenária convencional, sobretudo em cenários de elevada solicitação ambiental.

Além disso, o *taut-leg* apresenta redução significativa de custo para profundidades superiores a três mil pés (aproximadamente 914 m). Adicionalmente, observa-se uma intensa melhoria no posicionamento da plataforma (*stationkeeping performance*, capacidade da plataforma de se manter espacialmente fixa). Isso é possível devido a combinação de menores deslocamentos e baixa frequência de deslocamento (Wildel et al., 1996; Winkler e McKenna, 1995).

Ademais, a base teórica e os avanços tecnológicos demonstram as vantagens do uso de sistemas *taut-leg* em águas profundas, especialmente diante das demandas da indústria de exploração de óleo e gás. Porém, novos segmentos da indústria têm buscado amarrar estruturas de diferentes características em águas rasas, como as *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) para geração de energia eólica no mar (Ma et al., 2019). A utilização de diferentes configurações de amarração para as FOWT carece de investigação mais profunda, embora estudos iniciais indiquem que, para tais aplicações, uma abordagem híbrida (mistura entre os sistemas *taut* e catenárias) seja a resposta de melhor viabilidade econômica,

maior eficiência estrutural e maior desempenho hidrodinâmico. Cerfontaine et al. (2024) e Ward et al. (2024) investigaram um sistema chamado “semi-*taut*”, que combina as duas técnicas, e o compararam à catenária e ao *taut-leg*. No sistema de amarração híbrido, descobriram maior viabilidade para aplicação em sistemas de energia eólica flutuante, pois ao se combinar as duas técnicas obteve-se uma rigidez intermediária. O detalhamento desses sistemas junto à fixação de diferentes estruturas flutuantes é apresentado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Diferentes configuração de amarração de estruturas oceânicas.



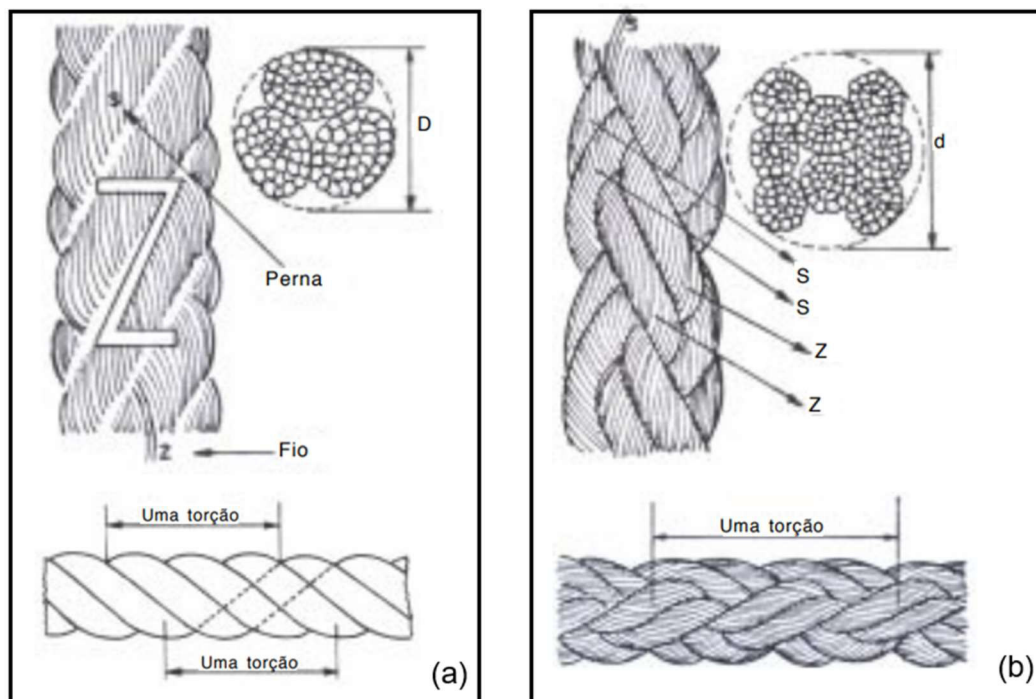
FONTE: Adaptado de Cerfontaine et al. (2024).

Na Figura 2.2 estão representadas diferentes estruturas flutuantes amarradas. A primeira, uma *spar* (estrutura vertical de casco cilíndrico) amarrada por catenárias, uma bargaça e um TLP amarrado por *taut* com mudança no ângulo das linhas, sendo o TLP considerado uma linha de amarração vertical. Por fim, uma estrutura semissubmersível amarrada por um arranjo semi-*taut*. Todas as estruturas mostradas na figura alicerçam uma torre de geração eólica, indicando possibilidade de amarração das FOWT (Cerfontaine et al., 2024).

Outro aspecto a ser explorado é o arranjo construtivo que constitui o cabo de amarração sintético. Segundo Fonseca (2005), o cabo de amarração é formado por multifilamentos, ou yarns, que, ao serem combinados por torções e tranças, dão origem ao produto final denominado cabo. Há de se considerar que, ainda segundo o autor, existem dois tipos principais de confecções de cabos: os torcidos de três

pernas, apresentado na Figura 2.3(a); e os trançados de oito pernas, apresentados na Figura 2.3(b).

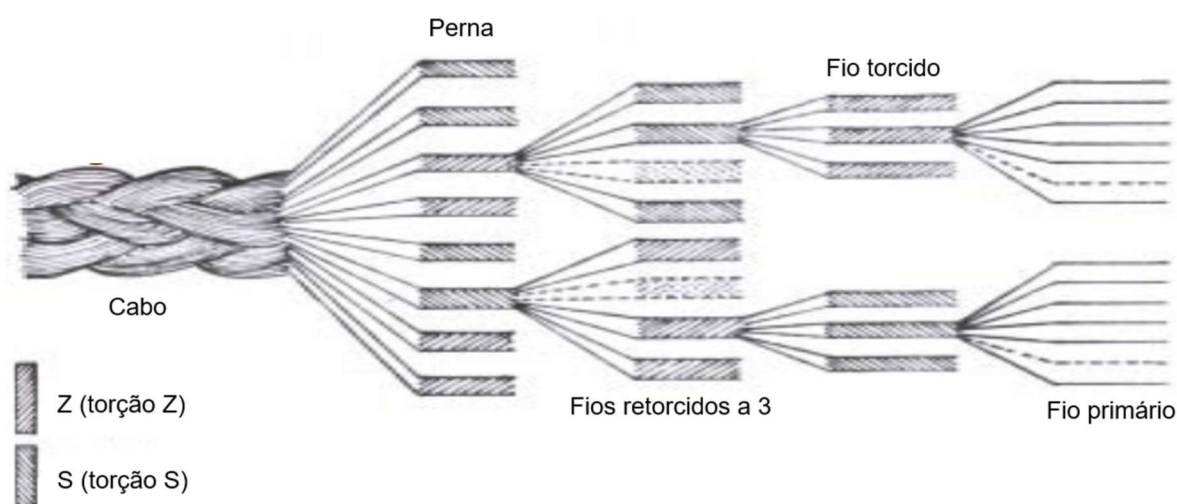
Figura 2.3 – Características construtivas dos cabos navais.



FONTE: Adaptado de Fonseca (2005).

Na Figura 2.3, também é possível visualizar a distinção entre o sentido de torção que pode ser à esquerda, denominado torção “S”, ou à direita, denominada torção “Z”. Essas torções são combinadas a fim de aplicar os esforços uniformemente sobre as fibras individuais. Dessa forma, a fabricação do cabo naval ocorre em etapas: inicialmente torcem-se os fios primários; em seguida, realiza-se a retorção desses fios em sentido oposto; por fim, os fios retorcidos são reunidos para formar uma perna do cabo (Fonseca, 2005). A união das pernas constitui o cabo finalizado, conforme Figura 2.4.

Figura 2.4 – Esquema de construção dos cabos navais.



FONTE: Adaptado de Fonseca (2005).

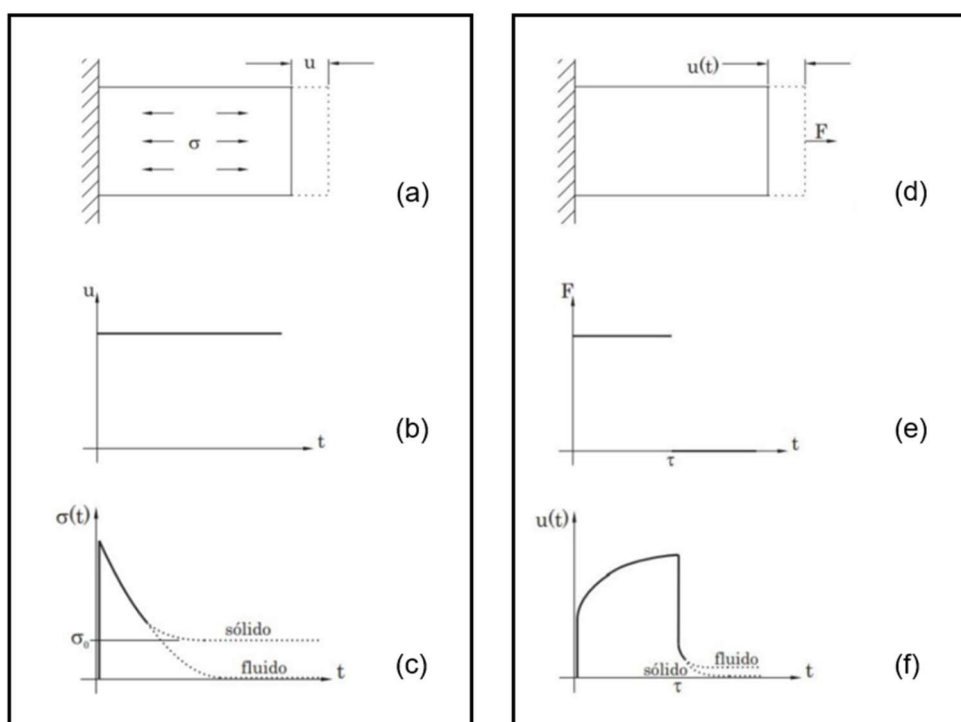
Desse modo, é possível constatar que a característica do cabo será dependente de seu aspecto construtivo, como por exemplo: passo de trança; sentido de torção; e número de pernas. Porém, as propriedades do cabo não são dependentes apenas da confecção dele, mas também das propriedades das fibras que o compõem, como por exemplo: relação constitutiva; rigidez; densidade linear; e alongamento sob carga (Fonseca, 2005). Segundo McKenna et al. (2004), Evans e Ridge (2005) e Pan e Brookstein (2001), cabo e multifilamento (*yarn*) resguardam alto índice de correlação entre suas propriedades, o que torna pertinente o ensaio mecânico no multifilamento para entender as características dos cabos, devido a praticidade e a economia.

Dada tal correlação e alta dependência das características da fibra utilizada no comportamento do cabo, torna-se fundamental entender os diferentes materiais sintéticos aplicados à confecção dos cabos *offshore*. Dentre os principais materiais utilizados para a fabricação de cabos podem ser citados: o poliéster, o náilon, o polipropileno e o polietileno (McKenna, 2004). Considera-se ainda que o foco dessa dissertação é a interação entre o poliéster do tipo politereftalato de etileno (PET) e o polietileno de alto módulo (HMPE, sigla para *High Modulus Polyethylene*). Essa associação será detalhada em seção posterior, mas trata-se de um corpo de prova composto por multifilamentos de ambos os materiais associados em série por meio de um elo metálico.

Destaca-se, como aspecto fundamental para o entendimento das fibras em estudo, a necessidade de caracterizar seu comportamento mecânico sob diferentes regimes de carregamento, tanto estáticos quanto dinâmicos. Para tal, é essencial compreender os principais regimes reológicos, os quais descrevem a relação entre tensão e deformação nos materiais. Esses regimes incluem os modelos elástico, plástico e viscoso, além de suas combinações, como os comportamentos elasto-plástico, viscoelástico e viscoplástico, que permitem representar de forma mais precisa os fenômenos mecânicos observados em materiais complexos (Bird, 1987).

Dito isso, classificam-se as fibras sintéticas como materiais de comportamento viscoelástico e viscoplástico, pois suas deformações são dependentes do tempo (Hirskorn et al., 2008; Colak e Dusunceli, 2006). Por isso, o material quando submetido a um alongamento constante (Figuras 2.5a e 2.5b) apresenta uma força aplicada decrescente ao longo do tempo (Figura 2.5c), fenômeno este chamado de relaxação; e quando submetido a uma força constante (Figuras 2.5d e 2.5e) apresenta deformação crescente ao longo do tempo (Figura 2.5f), fenômeno este chamado de fluência (Crema, 2007).

Figura 2.5 – Fluência e relaxação de um material viscoelástico.



FONTE: Adaptado de Crema (2007).

2.2. Normas e procedimentos de ensaios para cabos e multifilamentos

A investigação do comportamento mecânico das fibras utilizadas na fabricação de cabos de amarração é fundamental para prever como será a performance do cabo finalizado. Com isso, existem diversas normas que visam a padronizar os testes mecânicos em cabos e multifilamentos, a fim de produzir dados pertinentes a comparação entre as fibras.

Dessa forma, é possível elencar os principais testes realizados no multifilamento a fim de caracterizar a fibra, são eles: a densidade linear, o alongamento à ruptura (tração), a fadiga, a fluência, a abrasão fio-com-fio (*yarn-on-yarn* ou YoY). Além disso, existem protocolos de ensaios com cargas estáticas e dinâmicas com o intuito de observar como a fibra ou o cabo se comportam com um histórico de carregamentos mais complexos.

A densidade linear de um multifilamento, definida como a massa do material por unidade de comprimento, gramas por metro, é expressa em Tex. A determinação experimental desse parâmetro é realizada conforme o método padronizado pela ASTM International (sigla para *American Society for Testing Materials*) na norma ASTM D1577 (2001), “*Standard Test Methods for Linear Density of Textile Fibers*”, que especifica desde os requisitos de preparação das amostras até as condições de calibração e leitura dos instrumentos.

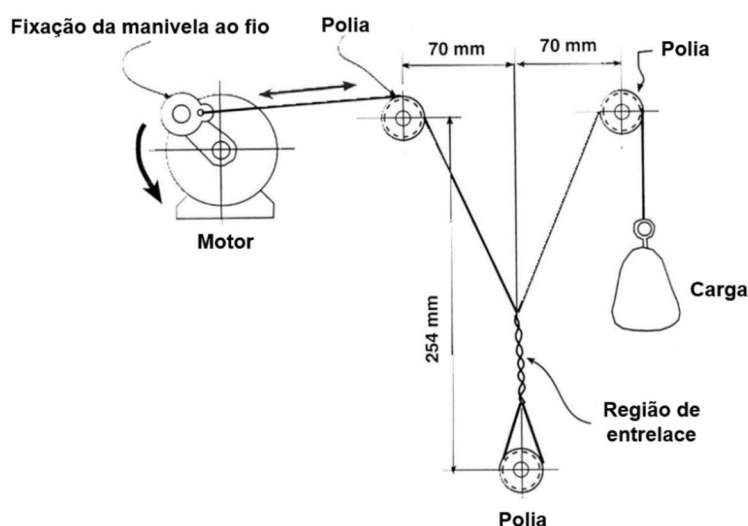
Ademais, a caracterização mecânica do fio inclui o ensaio de tração (alongamento à ruptura), cujo resultado principal é o *Yarn Breaking Load* (YBL) — a carga máxima suportada pelo filamento sob tração uniaxial. Esse ensaio segue os procedimentos da ISO 2066 (2010), “*Textiles – Yarns from packages – Determination of single-end breaking force and elongation at break using constant rate of extension (CRE) tester*”, que define a taxa de extensão constante, a geometria das garras e os critérios de medição da força de ruptura e do alongamento correspondente.

Outro teste pertinente é o que observa o comportamento da fibra sob fluência. A norma ISO 899-1 (2017), denominada “*Plastics – Determination of creep behavior – Part 1: Tensile creep*” apresenta as condições de ensaio, bem como a forma de apresentação das curvas de fluência para cada um dos corpos de prova.

Já a norma CI-1503 (2019) do *Cordage Institute* determina um modelo de teste para verificar a intensidade do dano que o atrito dos fios entre si causa no

multifilamento. Esse teste é denominado de abrasão fio-com-fio ou, mais comumente, abrasão *Yarn-on-Yarn* (YoY). Nele, em uma das extremidades do fio é fixado uma carga que varia de 2% a 6% da carga de ruptura (YBL) e na outra é fixado um elemento rotativo que devido ao arranjo apresentado na Figura 2.6 propicia o atrito na região de entrelace destacada.

Figura 2.6 – Configuração do ensaio de abrasão *Yarn-on-Yarn*.



FONTE: Adaptado de *Cordage Institute* (2019).

Na verificação da resistência à fadiga, aplica-se a norma ASTM D7791 (2022), denominada “*Standard Test Method for Uniaxial Fatigue Properties of Plastics*”. No contexto de multifilamentos, aplica-se apenas o procedimento A que descreve o ensaio para esforços de tração com o intuito de obter curvas que relacionem tensão e número de ciclos.

Na norma ISO 18692 (2007), encontram-se protocolos de ensaios mais complexos que têm por objetivo determinar a rigidez quase-estática e dinâmica do cabo. Na etapa de teste da rigidez quase-estática, o protocolo inicia com um acomodamento inicial (chamado de acamamento, do inglês *bedding*) de 10% da carga média de ruptura (MBS, sigla para *mean breaking strenght*) do cabo previamente obtida. Logo, aplica-se três ciclos iguais ao descrito:

- Aumenta-se a carga de 10% para 30% do MBS em um período de dois a seis minutos;
- Mantém-se 30% do MBS fixos por 30 minutos;

- Reduz-se a carga de 30% para 10% do MBS em um período de dois a seis minutos;
- Mantém-se 10% do MBS fixos por 30 minutos.

Para determinar a rigidez dinâmica do cabo deve ser realizado, sucessivo às etapas de rigidez quase-estática, outro protocolo de carregamentos. Aplica-se, aqui, uma sequência de carregamentos cíclicos com frequências iguais pertencentes ao intervalo de 0,03 Hz à 0,1 Hz:

- 100 ciclos de carregamento de 20% a 30% do MBS;
- 200 ciclos de carregamento de 30% a 40% do MBS;
- 300 ciclos de carregamento de 40% a 50% do MBS.

Cabe salientar que o protocolo apresentado pela ISO 18962 (2007) é destinado a testes de cabos confeccionados, sendo a sua aplicação em multifilamentos uma extensão ao previsto na norma. Esse trabalho aplica uma adaptação do protocolo apresentado a fim de se adequar melhor ao comportamento do multifilamento.

Além disso, a *American Bureau Shipping* (2021) apresenta um guia de aplicação prática de cabos de fibras na amarração *offshore*, no qual encontra-se sintetizado os testes já elencados. Nesse guia também aparecem especificações de uso tanto para multifilamentos como para cabos, ambos feitos de HMPE e PET.

2.3. Tecnologia dos materiais sintéticos para confecção de cabos

Nessa seção é discutida a evolução tecnológica dos materiais bem como sua aplicação e desempenho na confecção de cabos de amarração *offshore*. Além disso, são expostas as características e diferenças do PET e do HMPE.

Os sistemas de amarração para estruturas flutuantes evoluíram junto ao avanço da indústria *offshore*, com o intuito de atender as especificidades de ambientes complexos como as águas profundas e ultra profundas. Inicialmente, Del Vecchio (1992) identificou o poliéster como uma fibra altamente adequada a fabricação de cordas de amarração, devido a sua excelente relação de peso e resistência mecânica. Nos dias atuais, o poliéster é altamente utilizado em diversas

aplicações em águas profundas e ultra-profundas (Bureau Veritas, 2007), e é reconhecido pela Petrobrás como uma das fibras de alto desempenho mais utilizadas em sistemas de amarração, tanto em catenárias quanto em *taut-leg* (Rossi et al. 2010). Além disso, é uma fibra bastante consolidada no mercado para ser utilizada de amarrações em água rasas de estruturas flutuantes de energias renováveis (Lin, 2015).

Nesse sentido, a variedade tanto nas formas de construção de cabos quanto nos materiais empregados torna a análise de um sistema de amarração uma tarefa complexa. Pois, se por um lado o ambiente apresenta esforços externos – hidrodinâmicos e aerodinâmicos – aplicados à estrutura flutuante que podem oscilar em alta intensidade, o material de construção das cordas *offshore* apresentam comportamento viscoelástico e viscoplástico não linear. Esse conjunto de aspectos precisa ser entendido a fim de projetar uma linha de amarração satisfatória, confiável e segura (Ma, 2019; Ramzanpoor et al., 2025).

Conforme Weller et al. (2015), a criação de sistemas que explorem as possibilidades energéticas do mar só se tornará viável por meio da investigação dos componentes que estruturam a exploração atual do oceano em busca de melhorias e adaptações. Essas inovações já começam a surgir atualmente, acompanhadas do estudo de como os sistemas de amarração se degradam e alteram suas propriedades ao longo do tempo, por exemplo (Da Cruz et al., 2024).

A análise de degradação dos elementos de um sistema de amarração é crucial para estimar a vida útil da estrutura flutuante, otimizar a rentabilidade, prologar a produção e postergar os custos do descomissionamento (Del Vecchio e Biasotto, 2019). Segundo Cruz et al. (2024), as fibras de HMPE classificadas como *Low Creep* apresentam excelente resposta mecânica à fluência, pois quando submetidas a carregamentos usuais de 20% da sua carga de ruptura (YBL) e temperatura de 15°C, um dos HMPE teria vida estimada de 180 anos.

Rossi et al. (2010) elabora uma revisão de doze anos de utilização do poliéster em cabos de amarração de estruturas flutuantes comissionadas pela Petrobrás. O objetivo foi evidenciar que a utilização de materiais sintéticos nesses sistemas constitui uma tecnologia madura, respaldada pelo estudo detalhado dos modos de falha das fibras.

2.3.1. Rigidez de fibras sintéticas em linhas de amarração

A rigidez é a variável escolhida para analisar o comportamento da linha híbrida neste estudo, visto que os multifilamentos são associados em série para a performance dos ensaios mecânicos. Desse modo, a força aplicada em ambos segmentos será a mesma, a observância de como se comporta a rigidez de cada um dos materiais e a rigidez total da linha, aparenta ser adequado ao arranjo em série que será proposto. Além disso, a rigidez é altamente correlacionada à absorção de energia e ao desempenho estrutural da linha de amarração (Martin e Bihs, 2021).

O teste de rigidez apresentado na norma ISO 18692 (2007) e sintetizado na *American Bureau Shipping* (2021) é uma abordagem consolidada e utilizada para avaliar o desempenho das linhas de amarração.

Nesse escopo, Liu et al. (2015) desenvolveram um sistema experimental para simular o carregamento dinâmico a fim de investigar a rigidez em cabos *offshore* danificados. Foi observado que o comportamento da rigidez dinâmica em cabos de fibras sintéticas danificados depende de diversos fatores, como por exemplo: tipo de material, a construção do cabo, a condição do carregamento e do dano. Esse estudo concluiu que a rigidez dinâmica:

- Aumenta com o aumento do número de ciclos de carregamento;
- Aumenta com o aumento da carga média aplicada;
- Diminui com o aumento da amplitude de deformação;
- Diminui com o nível de dano presente na amostra.

Colomé et al. (2015) desenvolveram, também, os protocolos de rigidez em cabos de poliéster a fim de entender seu comportamento. Nesse estudo, foram testadas as três etapas do teste: o acamamento; a rigidez quase-estática; e a rigidez dinâmica. Com isso, observaram que a rigidez da fibra:

- Aumenta com o aumento da carga média aplicada;
- Aumenta com o aumento da frequência de carregamento;
- Diminui com o aumento da amplitude de carregamento.

Por outro lado, existem ainda poucos estudos voltadas aos testes de rigidez aplicados às fibras sintéticas. Melito et al. (2020) aplicaram o protocolo a fios virgens

e a fios retirados de cordas já utilizadas e observaram que não houve diferença significativa entre a rigidez de ambas as amostras.

2.4. Uso de imagem como instrumentação de ensaios mecânicos

Nesta seção, faz-se um panorama do uso de imagem como instrumentação de ensaios mecânicos, com o intuito de fundamentar o caminho de desenvolvimento que culmina na recente aplicação dos modelos de visão de computacional na observância de fenômenos e objetos.

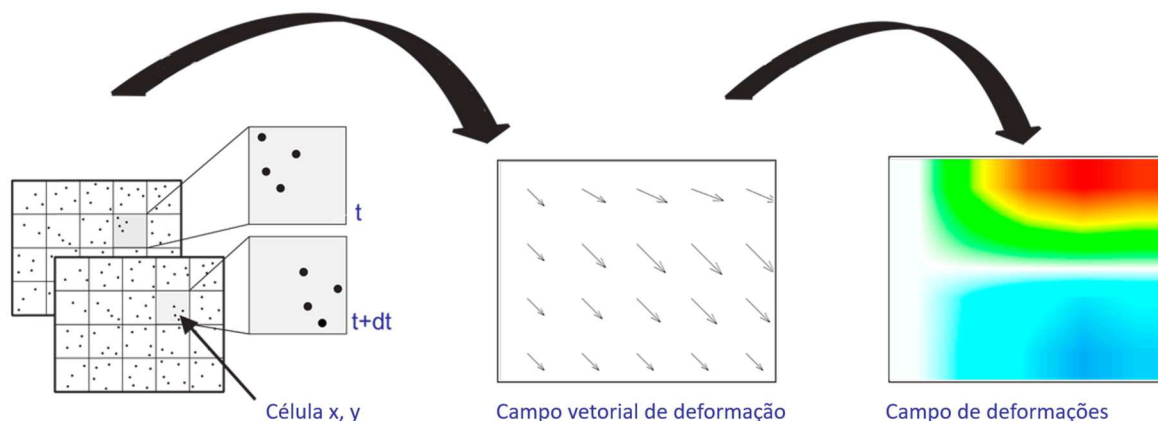
Nos últimos anos, tecnologias como a visão computacional e o aprendizado de máquina têm sido cada vez mais integradas à pesquisa experimental em engenharia de materiais (Baldner et al., 2019). Essa integração visa a aumentar a precisão na aquisição de dados, reduzir o erro humano e possibilita novas abordagens para a interpretação de fenômenos mecânicos complexos (Ray, 2024; Reyes e Maruyama, B., 2019). Tradicionalmente, a caracterização mecânica de materiais — como testes de tração, fadiga e fluência — depende de sensores físicos acoplados à máquina de teste. No entanto, esses métodos apresentam limitações em termos de resolução espacial e na capacidade de capturar deformações distribuídas por toda a superfície do material (Zhu et al., 2019; Bolzon, G., 2015).

A Correlação Digital de Imagens (DIC, do inglês *Digital Image Correlation*) surgiu como uma alternativa poderosa, oferecendo medições de deslocamento e deformação derivadas de sequências de imagens de alta resolução (Gdoutos, 2021). No entanto, a DIC convencional ainda enfrenta desafios como a sensibilidade ao ruído e a exigência de pré-processamento meticuloso da imagem. Recentemente, técnicas de aprendizado profundo — particularmente redes neurais convolucionais (CNNs) — foram aplicadas à DIC com o objetivo de automatizar e aprimorar a técnica (Yang et al., 2021; Cheng et al., 2023). Estudos mostraram que redes como a *StrainNet* podem estimar campos de deslocamento com precisão comparável à DIC tradicional, ao mesmo tempo em que oferecem maior velocidade de processamento e menor dependência de ajustes manuais (Wang & Zhou, 2024).

A DIC analisa superfícies e consegue representar a distribuição das deformações ao longo dos elementos. Na Figura 2.7, observa-se que a superfície é discretizada em célula x e y , para com isso, analisar a modificação dos padrões de um instante inicial (t) para o instante seguinte ($t + dt$). Por meio dessa análise, é

possível determinar o campo vetorial da deformação sobre a superfície e representar o campo de deformações.

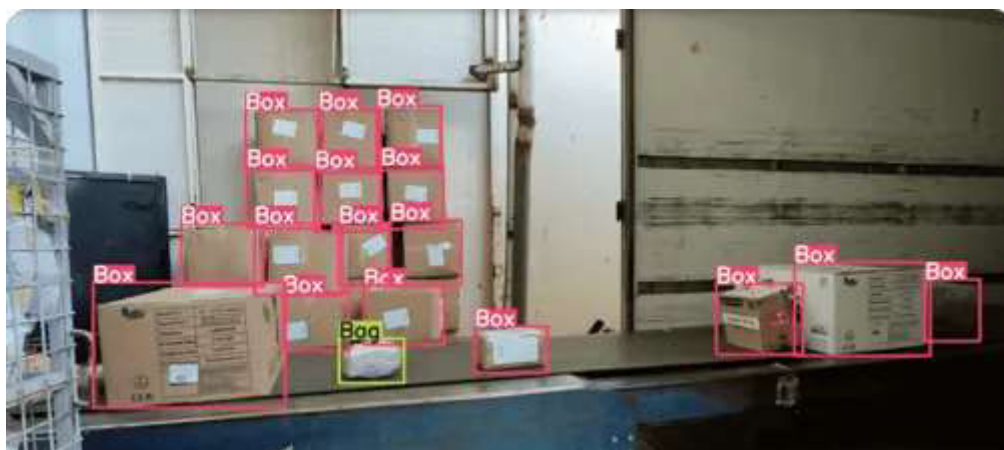
Figura 2.7 – Processamento por DIC.



FONTE: Adaptado de Lavision (2025).

Simultaneamente, modelos avançados de detecção de objetos baseados na arquitetura YOLO (*You Only Look Once*) têm sido explorados em tarefas de inspeção industrial, com foco na detecção de defeitos, identificação de falhas estruturais e análise em tempo real (Ultralytics, 2024). Em paralelo, aplicações recentes abrangem desde a inspeção de componentes metálicos compósitos até o monitoramento da integridade estrutural baseado em vídeo (Hussain, 2023; Ansari, 2019). Essa convergência da visão computacional e da engenharia mecânica abre novas vias para a análise de deformações, mesmo em materiais com geometrias e comportamentos não convencionais, como multifilamentos de poliéster (Prakash e Palanivelan, 2024; Dwivedi et al., 2024). Na Figura 2.8, observa-se um exemplo de aplicação do YOLO no rastreamento e contagem de caixa para transporte.

Figura 2.8 – Aplicação do YOLO.



FONTE: Ultralytics (2024).

O uso de métodos não invasivos, como a análise de vídeo, apresenta uma alternativa valiosa para a caracterização mecânica de materiais flexíveis e frágeis (Pan et al., 2017). No caso específico dos multifilamentos de poliéster — amplamente utilizados em tecidos técnicos, biomateriais e componentes estruturais leves — a medição do deslocamento é frequentemente dificultada por sua geometria fina, comportamento anisotrópico e alta deformabilidade (Pascual et al., 2016).

A adoção de bibliotecas de código aberto, como *OpenCV* e YOLO, torna a metodologia proposta acessível, replicável e escalável — mesmo para laboratórios com recursos limitados (Pan et al., 2017). Estudos recentes destacam o potencial transformador das técnicas de visão computacional na análise de deformações e falhas de materiais. Notavelmente, o estudo intitulado “*Deep DIC*” apresenta um sistema baseado em aprendizado profundo que mede diretamente deslocamentos e deformações a partir de imagens, abordando efetivamente os desafios da DIC tradicional, como ruído e complexidade de processamento (Shaw et al., 2021). Da mesma forma, o desenvolvimento do *StrainNet* demonstra a capacidade das redes neurais convolucionais de extrair eficientemente dados de deformação de campo completo, reduzindo a dependência de pré-processamento extenso (Zhu et al., 2019).

A integração de algoritmos de visão computacional na inspeção de materiais e análise de deformações tem mostrado avanços significativos. A DIC provou ser eficaz na medição de deformações em tecidos biológicos, fornecendo informações de deslocamento e deformação de campo completo com alta precisão, como

demonstrado em estudos envolvendo tecido de peito de frango (Chen et al., 2021). Enquanto isso, algoritmos baseados em YOLO — especialmente variantes aprimoradas como EDC-YOLO e CS-YOLO — se destacaram na detecção de defeitos em vários materiais, demonstrando sua versatilidade e capacidade operacional em tempo real (Wen et al., 2024; Xu et al., 2024).

2.5. Tecnologia da visão computacional por meio do YOLO

O presente trabalho utiliza como ferramenta para analisar as deformações no ensaio mecânico híbrido a visão computacional, por meio da biblioteca YOLO. Cabe salientar que se entende como híbrido, nesse caso, a associação em série de dois materiais diferentes em um corpo de prova. Desse modo, faz-se necessário entender como funciona a biblioteca e como ela se aplica ao estudo.

O YOLO, sigla em inglês para “Você Só Olha Uma Vez”, é uma família de algoritmos e modelos de aprendizado de máquina amplamente utilizada para detecção de objetos em tempo real na área de visão computacional (Ultralytics, 2024). A biblioteca aplicada ao python é capaz de:

- identificar objetos (reconhecer a presença de determinada classe de objeto na imagem);
- localizar objetos (identificar quais os *frames* do vídeo contêm o determinado objeto localizado);
- classificar objetos (determinar qual a classe (categoria) cada objeto localizado pertence).

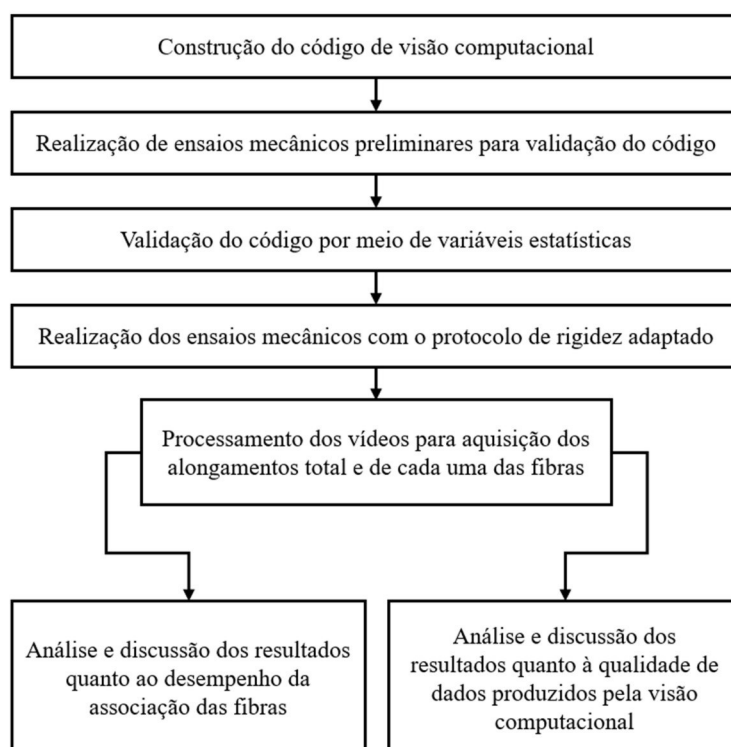
O YOLO executa todas essas funções por meio da segmentação da imagem em grades que investigam a possibilidade de o objeto buscado existir ou não dentro do segmento. Ao fazer esse processamento global e simultâneo, o algoritmo consegue garantir velocidade de processamento e alta precisão.

Nesse contexto, existe um número finito de classes que o YOLO consegue identificar. Para além delas, o usuário deve treinar o rastreo, para que o algoritmo seja capaz de localizar objetos diferentes da lista pré-estabelecida pela idealizadora da biblioteca (Ultralytics, 2024).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado o caminho metodológico para construção do trabalho. Na Figura 3.1 está disposto o fluxograma que sumariza o procedimento de pesquisa. Todos os ensaios mecânicos foram conduzidos no Laboratório de Análise de Tensões da Universidade Federal do Rio Grande (POLICAB – FURG).

Figura 3.1 – Fluxograma metodológico.



FONTE: O autor (2025).

3.1. Construção do corpo de prova

Com o objetivo de observar o comportamento mecânico de uma linha híbrida de materiais associados em série, construiu-se um corpo de prova híbrido para a execução dos ensaios mecânicos conforme apresentado na Figura 3.2 e esquematizado na Figura 3.3. A geometria de corpo de prova apresentada é proposta por esse estudo, pois não há norma que determine ensaios híbridos em multifilamentos.

Desse modo, cada multifilamento tem suas extremidades fixas a um papel cartão que foi preso à máquina de tração, enquanto seu comprimento passa pelo interior de um elo de corrente que une o segmento de PET e o segmento de HMPE.

Figura 3.2 – Corpo de prova híbrido com dois materiais associados em série.



FONTE: O autor (2024).

Os materiais utilizados no estudo têm propriedades mecânicas distintas, principalmente a carga de ruptura (YBL, sigla para *Yarn Breaking Load*) e a densidade linear. Essas propriedades, tanto para o PET quanto para o HMPE, utilizadas nesse trabalho apresentam-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resumo de propriedades do PET e do HMPE.

	YBL [N]	Densidade Linear [tex]
PET	171,44	222,3
HMPE	597,92	176,9

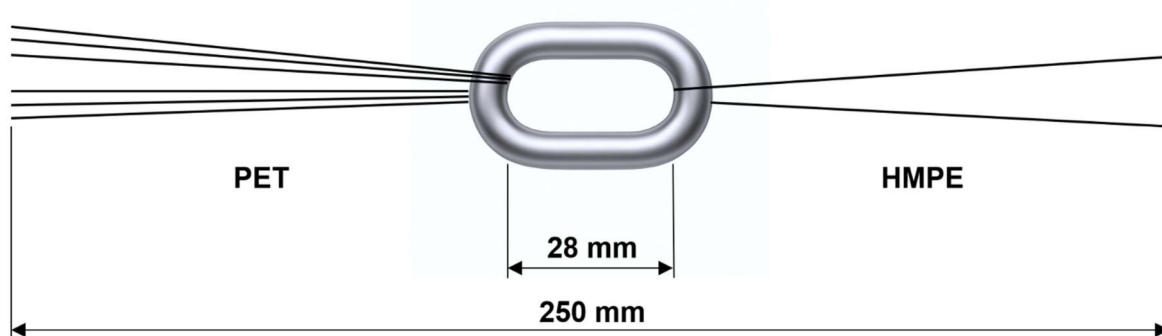
FONTE: O autor (2024).

Com isso, sublinha-se que a diferença entre as cargas de ruptura para cada um dos materiais tornaria difícil a aplicação do teste de rigidez para ambas as fibras simultaneamente, pois o teste é feito a partir de porcentagens do YBL. Por esse motivo, elaborou-se um corpo de prova com 3 fios de PET e 1 fio de HMPE para que a carga de ruptura dos trechos fossem mais próximas.

Logo, as cargas de ruptura ficaram 1028,64 N e 1195,84 N para os seis segmentos de PET e para os dois segmentos de HMPE, respectivamente. Ainda, é necessário obter um valor apenas de YBL para ser a referência inserida no ensaio, dessa forma, obteve-se 1112,24 N como YBL médio das duas fibras para a

configuração 6/2 fios apresentada. O esquemático dessa configuração é exposto na Figura 3.3.

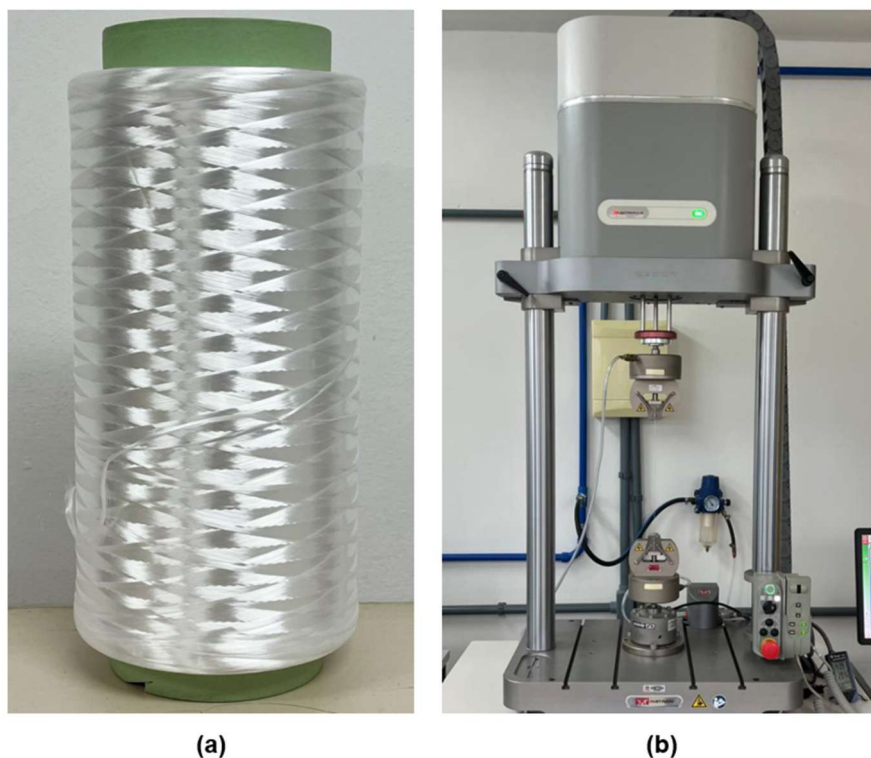
Figura 3.3 – Imagem esquemática do corpo de prova híbrido.



FONTE: O autor (2024).

Para o desempenho dos ensaios do estudo, os fios foram extraídos de bobinas como mostra a Figura 3.4a. O protocolo do teste de rigidez foi programado em módulos no *software* próprio da máquina de ensaios universal *Instron Electropuls E3000* apresentada na Figura 3.4b.

Figura 3.4 – Bobina de HMPE e máquina *Instron Electropuls E3000*.



FONTE: O autor (2024).

3.2. Construção do código de visão computacional

Visto que o equipamento de tração fornece apenas o deslocamento total, ou seja, o alongamento conjunto dos dois materiais associados em série, foi construído um código de visão computacional para, por meio de um vídeo do ensaio mecânico, extrair as parcelas de alongamento do corpo de prova híbrido. O código foi elaborado em *Python 3.12* e utilizou, principalmente, as bibliotecas *OpenCV* e *You Only Look Once (YOLO)*.

O código precisa identificar no vídeo elementos para rastrear e calcular as distâncias (alongamentos), isso é feito por meio da função interna do YOLO chamada *tracking*. No caso desse trabalho, utilizam-se adesivos de placas de pare, conforme Figura 3.5, fixas às garras da máquina de tração e ao elo de corrente que une os segmentos. Usa-se placas de pare devido ao YOLO já ter um conjunto de dados bastante robusto para essa classe específica de objetos.

Figura 3.5 – Demonstrativos das placas de pare fixas ao ensaio mecânico.

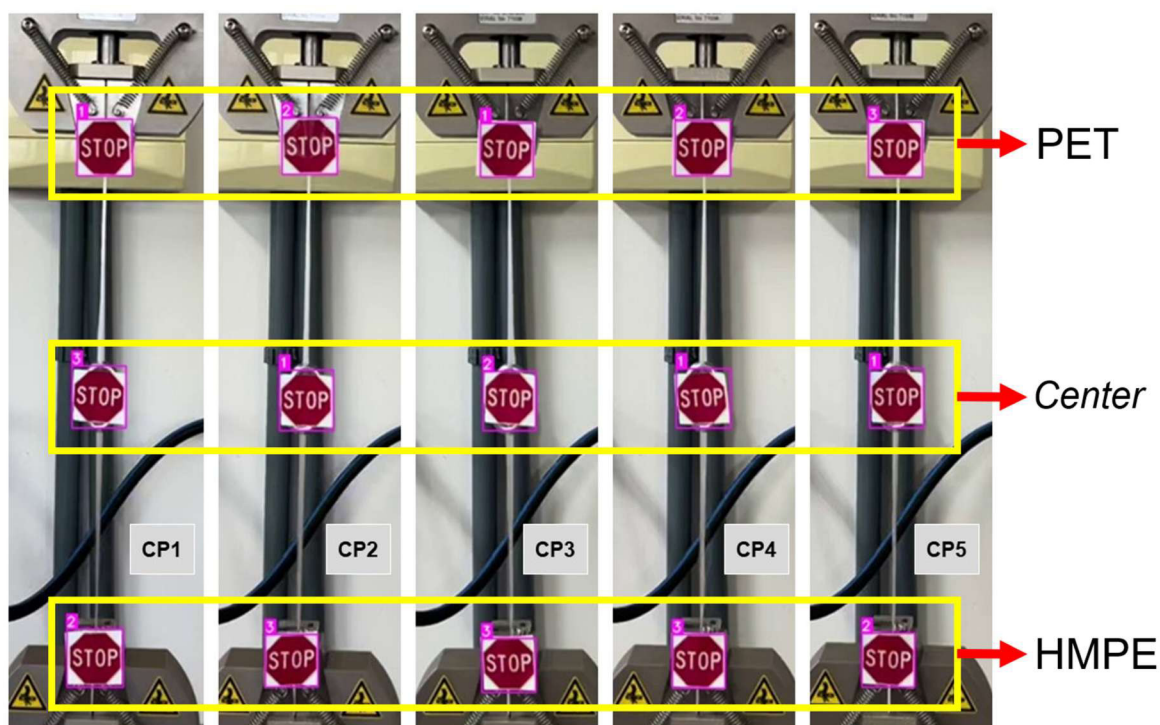


FONTE: O autor [2025]

Para que esse processo de rastreamento seja efetivo, faz-se necessária uma etapa preliminar de pré-processamento, que consiste em isolar o primeiro *frame* do vídeo, aplicar nele a função *tracking* que é usada ao longo do vídeo e obter uma prévia de como o rastreamento se comporta. Isso é feito para certificar que as placas de pare foram corretamente localizadas, que as distâncias foram corretamente atribuídas e qual

identificador numérico (ID) o YOLO aplicou para cada placa de pare. Na figura 3.6, é possível observar as três placas de pare com caixas delimitadoras (*box*) e seus respectivos IDs. Além disso, observa-se que para cada corpo de prova o YOLO distribuiu de forma diferente os IDs, o que reitera a importância do pré-processamento na rastreabilidade de qual alongamento será calculado.

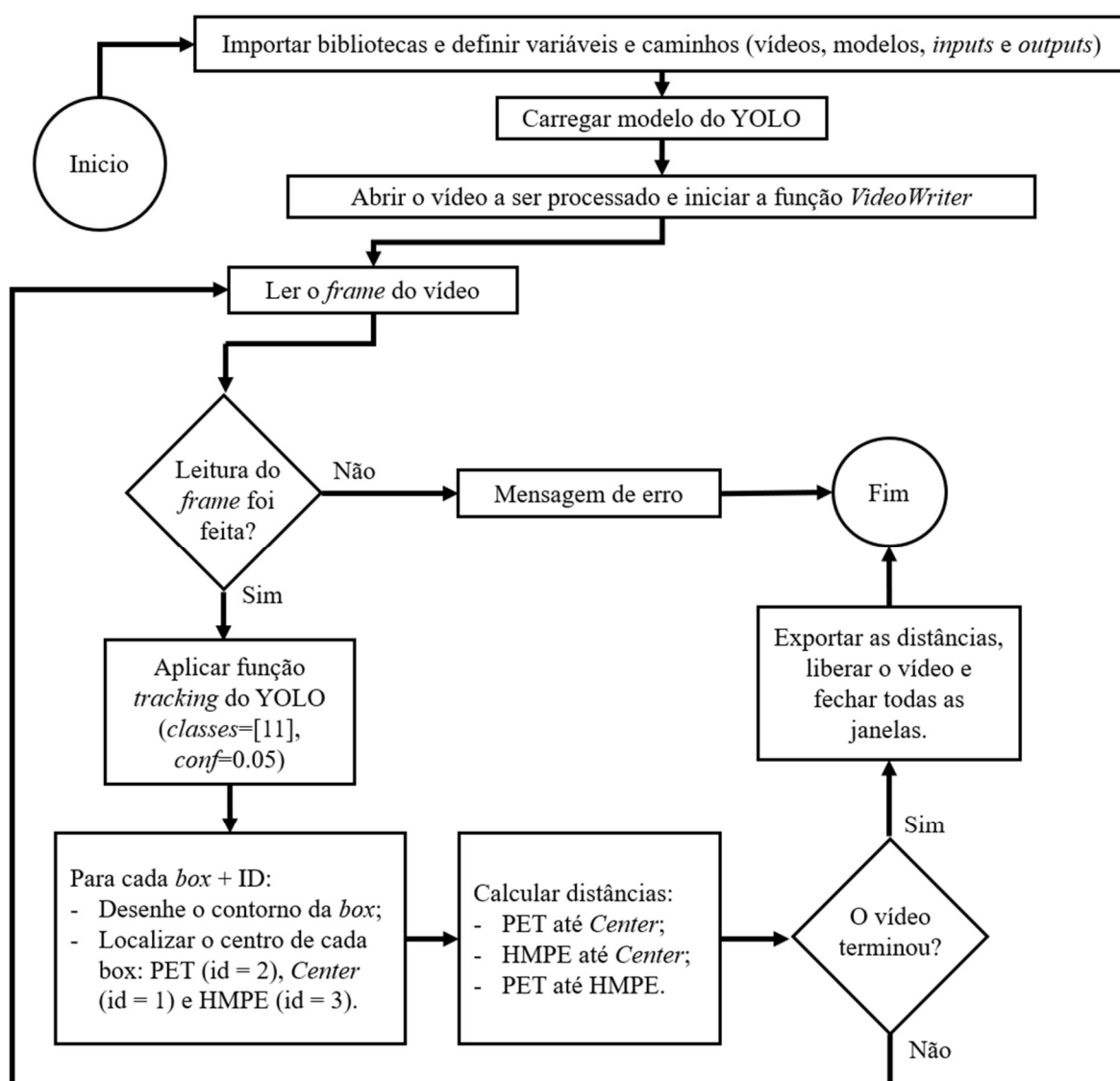
Figura 3.6 - Exemplo de localização das *box* e aplicação das identificações (ID).



FONTE: O autor (2024).

As bibliotecas utilizadas no processamento dos vídeos foram: *OpenCV*, *math*, *pandas* e *YOLO*. O código inicia importando essas bibliotecas para, em seguida, definir o *input* e o *output* do arquivo de vídeo do ensaio mecânico. Após, carrega-se o modelo do YOLO11x (versão 11 e tamanho “x”) que será aplicado a cada um dos *frames* do vídeo. Na Figura 3.7, apresenta-se o fluxograma de processamento do código de visão computacional desenvolvido para processamento do vídeo completo, que obtém os alongamentos do HMPE, do PET e total.

Figura 3.7 – Fluxograma de processamento do código de visão computacional.



FONTE: O autor (2025).

Com isso, lê-se o primeiro *frame* do vídeo e é verificado se a leitura foi bem sucedida. Em caso afirmativo, aplica-se a função *tracking* ao *frame* do vídeo com o objetivo de localizar a classe onze (placas de pare) com uma confiança de 0,05, confiança esta, baixa, porém suficiente para evitar a localização de falsos objetos.

Uma caixa limitadora (*box*) é adicionada aos objetos localizados e o ponto centróide deles é determinado. Atribui-se uma identificação para cada um desses objetos vinculado à posição dele no ensaio, números 1, 2 e 3 da Figura 3.6, que relaciona os pontos identificados com a posição das extremidades dos multifilamentos no ensaio, PET superior e HMPE inferior.

Por fim, são calculadas e salvas as distâncias entre cada um dos pontos centróides, sendo: alongamento do PET igual a distância entre os pontos PET e *Center*; alongamento do HMPE igual a distância entre os pontos HMPE e *Center*; e o alongamento total igual à distância entre os pontos HMPE e PET. O ciclo se repete até que todos os frames do vídeo sejam analisados. Quando isso ocorre, todas as distâncias calculadas são exportadas para arquivos externos e o código finaliza seu processamento.

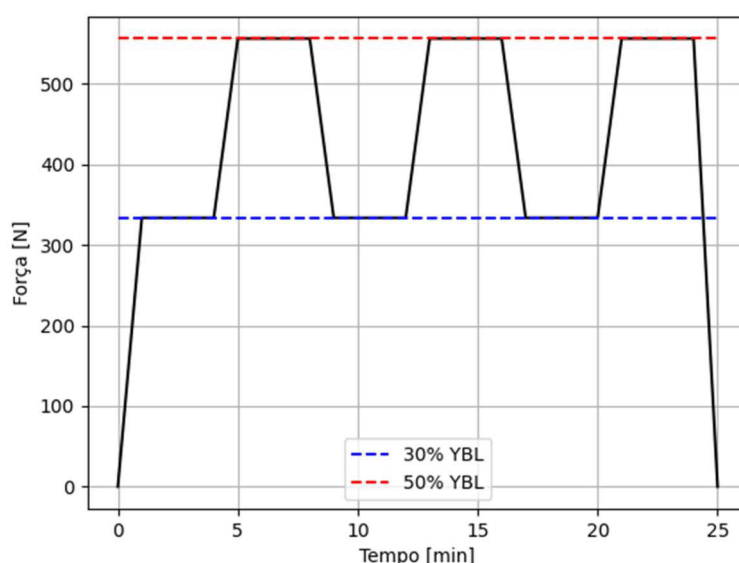
3.3. Ensaios mecânicos preliminares para validação do código

Com intuito de realizar a validação do código desenvolvido de visão computacional na obtenção dos deslocamentos de um ensaio mecânico, foram realizados um conjunto de testes preliminares, compostos por três corpos de prova para cada condição. O protocolo de rigidez da ISO 18692 (2007) foi reduzido para que o processamento fosse mais ágil nessa etapa do trabalho. A flutuação da carga aplicada é mostrada na Figura 3.8.

As condições aplicadas à validação foram:

- 40% do comprimento de HMPE e 60% de PET;
- 50% do comprimento de HMPE e 50% de PET;
- 60% do comprimento de HMPE e 40% de PET.

Figura 3.8 – Gráfico de flutuação da carga aplicada.



FONTE: O autor (2024).

O ensaio mecânico preliminar foi uma adaptação do teste para ensaios de rigidez quase-estática com as seguintes modificações: tempo de carregamento mais curtos (carregamentos que, segunda a norma, eram de 30 minutos foram reduzidos para 5 minutos); e cargas mais intensas (variou da norma de 10% e 30% para 30% e 50%, com o intuito de obter maiores deslocamentos ao longo da verificação). Foram executados três ciclos quase-estáticos (QSS) modificados e um resumo dos passos do ensaio é apresentado na Tabela 3.2. Cabe salientar que o YBL utilizado para todos os testes de rigidez desse trabalho é o chamado YBL médio das duas fibras, já discutido, e igual à 1112,24 N.

Tabela 3.2 – Descrição do teste preliminar.

	Passo	Descrição
QSS 1	R1	Rampa até 30% YBL com duração de 1 minuto
	H1	Sustentação dos 30% YBL durante 3 minutos
	R2	Rampa até 50% YBL com duração de 1 minuto
	H2	Sustentação dos 50% YBL durante 3 minutos
QSS 2	R3	Rampa até 30% YBL com duração de 1 minuto
	H3	Sustentação dos 30% YBL durante 3 minutos
	R4	Rampa até 50% YBL com duração de 1 minuto
	H4	Sustentação dos 50% YBL durante 3 minutos
QSS 3	R5	Rampa até 30% YBL com duração de 1 minuto
	H5	Sustentação dos 30% YBL durante 3 minutos
	R6	Rampa até 50% YBL com duração de 1 minuto
	H6	Sustentação dos 50% YBL durante 3 minutos
	R7	Rampa até 0 N de 1 minuto

FONTE: O autor (2024).

3.4. Processo de validação do código de visão computacional

Para validar o emprego do código na leitura dos deslocamentos, foram aplicados aos ensaios preliminares o processamento do vídeo e comparadas as leituras de deslocamento total do multifilamento. Com isso, confrontou-se os resultados obtidos pela máquina de ensaio *Instron* E3000 e os obtidos por meio da visão computacional.

As métricas estatísticas utilizadas no trabalho foram: o Erro Médio Absoluto (MAE, sigla para *Mean Absolute Error*); a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE, sigla para *Root Mean Squared Error*); e a Correlação de Pearson (r). Todas as métricas aqui apresentadas foram expressas conforme Bussab e Morettin (2013).

O MAE calculou a média das diferenças absolutas entre os valores do código de visão computacional e os valores da máquina de tração. Na prática, indica a distância média que uma variável medida está de um referencial e sua forma apresenta-se na Equação 3.1.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3.1)$$

No qual:

- n : número de observações;
- y_i : valor real da amostra i ;
- $\hat{y}_i$: valor previsto para a amostra i ;
- $|y_i - \hat{y}_i|$: diferença absoluta entre real e previsto.

O RMSE ao elevar as diferenças entre a variável medida e o referencial ao quadrado, essa métrica penaliza em maior intensidade erros grandes. Porém, ao fim do processo é extraída a raiz quadrada, o que resulta em um erro médio mantido em mesma unidade da variável medida. Apresenta-se a forma o RMSE na Equação 3.2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3.2)$$

O coeficiente de correlação de Pearson (r) compara duas variáveis com o objetivo de identificar e quantificar a relação linear entre elas. Quando aplicado a esse trabalho, teve como intuito investigar se os dois alongamentos medidos (máquina e código) ao longo do ensaio variam juntos de forma consistente. A forma

matemática do coeficiente é apresentada na Equação 3.3 e a forma matemática do cálculo de valor-p associado ao coeficiente é apresentado na Equação 3.4.

Associado ao coeficiente de correlação de (r), aplica-se o valor-p para avaliar se a correlação identificada por Pearson é estatisticamente significativa ou se pode ter ocorrido por acaso. Um valor-p inferior à 0,05 demonstra uma correlação significativa. A forma matemática do valor-p apresenta-se na Equação 3.4.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.3)$$

$$p = 2 \cdot P(T \geq |t|) \quad (3.4)$$

No qual:

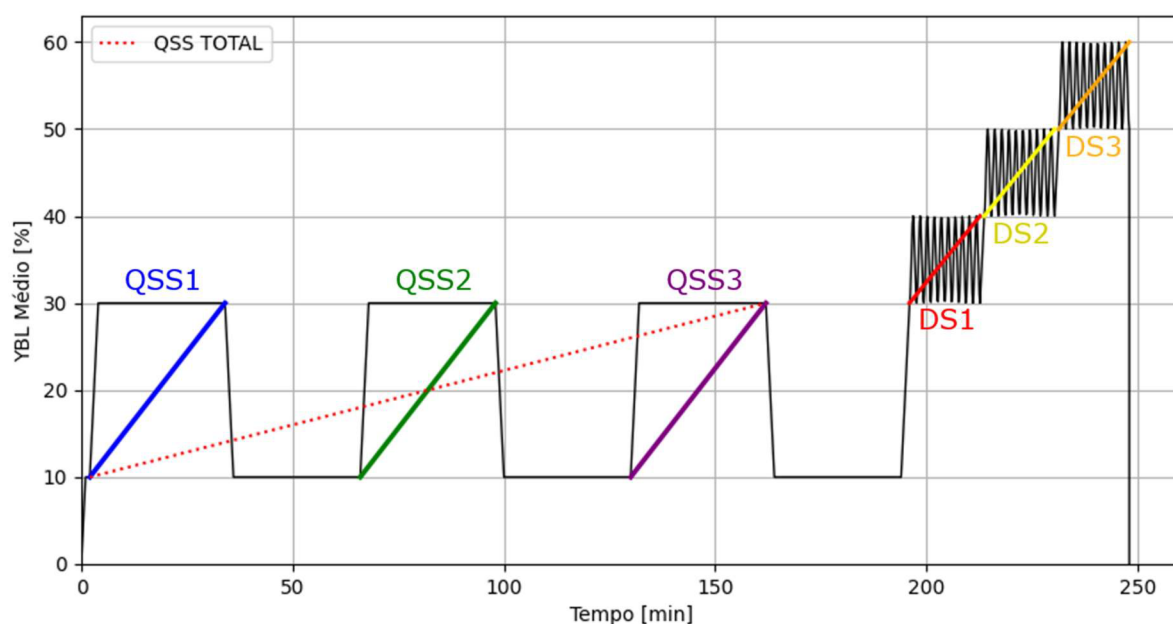
- t : valor da estatística de teste calculada a partir dos dados;
- T : variável aleatória com distribuição t de *Student*, com os graus de liberdade adequados;
- $P(T \geq |t|)$: probabilidade de obter um valor maior ou igual a $|t|$ sob a hipótese nula;
- O fator 2 aparece porque o teste é bicaudal, ou seja, ele considera tanto desvios positivos quanto negativos em relação à média esperada.

Ao comparar os resultados para as diferentes métricas estatísticas aplicadas, pode-se identificar a correspondência entre os dados produzidos pelo código de visão computacional e a leitura referencial feita pela máquina de tração.

3.5. Protocolo de rigidez adaptado para avaliação das linhas híbridas

Com o código de visão computacional definido e validado, foi executado o teste de rigidez completo, a fim de observar o impacto da associação em série de duas fibras em uma linha de amarração. O protocolo apresentado na Figura 3.9 é uma adaptação ao recomendado pela norma ISO 18692 (2007).

Figura 3.9 – Representação gráfica dos testes de rigidez.



FONTE: O autor (2025).

O ensaio mecânico realizou três carregamentos estáticos de 10% a 30% sucessivos para em seguida executar três carregamentos dinâmicos sequenciais, todos com amplitude igual a 5% do valor médio do YBL, com valores médios ascendentes de 35%, 45% e 55% do YBL de referência, conforme descrição da Tabela 3.3.

Os testes foram executados e filmados para as sete seguintes condições:

- Condição 1: 50% do comprimento de HMPE e 50% de PET;
- Condição 2: 60% do comprimento de HMPE e 40% de PET;
- Condição 3: 40% do comprimento de HMPE e 60% de PET;
- Condição 4: 70% do comprimento de HMPE e 30% de PET;
- Condição 5: 30% do comprimento de HMPE e 70% de PET;
- Condição 6: 100% do comprimento de HMPE;
- Condição 7: 100% do comprimento de PET.

Tabela 3.3 – Descrição dos testes de rigidez.

		Passo	Descrição	
Pré-teste		R1	Rampa até 10% YBL de 1 minuto	
		H1	Sustentação por 1 minuto (10% YBL)	
QSS	QSS1	R2	Rampa até 30% YBL de 2 minutos	
		H2	Sustentação por 30 minutos (30% YBL)	
		R3	Rampa até 10% YBL de 2 minutos	
	QSS2	H3	Sustentação por 30 minutos (10% YBL)	
		R4	Rampa até 30% YBL de 2 minutos	
		H4	Sustentação por 30 minutos (30% YBL)	
	QSS3	R5	Rampa até 10% YBL de 2 minutos	
		H5	Sustentação por 30 minutos (10% YBL)	
		R6	Rampa até 30% YBL de 2 minutos	
		H6	Sustentação por 30 minutos (30% YBL)	
	DS	DS1	R7	Rampa até 10% YBL de 2 minutos
			H7	Sustentação por 30 minutos (10% YBL)
		DS2	R8	Rampa até 30% YBL de 2 minutos
			C1	100 ciclos de 30-40% YBL com 0,1 Hz
DS3		R9	Rampa até 40% de 1 minuto	
		C2	100 ciclos de 40-50% YBL com 0,1 Hz	
		R10	Rampa até 50% de 1 minuto	
		C3	100 ciclos de 50-60% YBL com 0,1 Hz	
		R11	Rampa até 0% YBL de 5 minutos	
Tempo total = 253 minutos (15180 segundos)				

FONTE: O autor (2024).

Dessa forma, para determinar a rigidez quase-estática e dinâmica, utiliza-se a equação 3.5. Nela são inseridos seis parâmetros: a carga de ruptura (YBL); o comprimento inicial da amostra (l_0); a carga aplicada no início da etapa de análise (F_1); a carga aplicada ao fim da etapa de análise (F_2); a variação do comprimento da amostra nesse instante (); a carga aplicada ao final da etapa; e a variação de comprimento da amostra (l_2). É importante que as unidades de forças aplicadas estejam na mesma unidade do YBL ao passo que as unidades de comprimento também sejam iguais.

$$QSS, DS = \frac{\frac{F_2 - F_1}{YBL}}{\frac{l_2 - l_1}{l_0}} \quad (3.5)$$

A rigidez apresentada na Equação 3.5 foi calculada para cada um dos ciclos estáticos (QSS1, QSS2 e QSS3) e para cada um dos ciclos dinâmicos (DS1, DS2 e DS3). Esses valores de rigidez foram obtidos para cada uma das condições simples híbridas já citadas, sendo que para cada condição foi executada três corpos de prova.

Por fim, apresenta-se a forma utilizada para calcular a tensão aplicada em um multifilamento na Equação 3.6. Essa forma é composta pela força aplicada ao fio (F), a massa específica do material (ρ) e densidade linear do multifilamento (ρ_L).

$$\sigma [MPa] = \frac{F [N] \cdot \rho [g/cm^3]}{\rho_L [g/cm]} \quad (3.6)$$

3.6. Características do processamento do vídeo

Por fim são apresentadas as características do processo de filmagem. Todos os ensaios mecânicos foram filmados utilizando um aparelho celular da marca Motorola, modelo Moto E20, um celular básico com uma câmera traseira de 13 Mp. Os vídeos foram feitos com resolução de *High Definition* (HD) com 1080 por 720 pixels e uma velocidade de captura de 30 *frames* por segundo. As escolhas de resolução do vídeo foram feitas a fim de equilibrar bons resultados de medição e tamanho final de arquivo reduzido, uma vez que o tempo de processamento por visão computacional é altamente sensível ao tamanho do arquivo a ser processado.

Os vídeos foram transferidos ao fim do ensaio para o armazenamento do computador e processados posteriormente. Seria uma possibilidade para o YOLO o processamento simultâneo, “ao vivo”, porém optou-se por separar os dois momentos, gravação e processamento, para facilitar o ajuste do código. Ainda, os vídeos foram processados em um computador com: memória SSD de 500 GB; memória RAM de 16 GB; processador 13ª geração modelo *Intel* i7 13650HX; e placa de vídeo de 6 GB.

Além disso, apresenta-se na Figura 3.10, o ambiente de ensaio com um corpo de prova marcado com as placas de pare fixo a máquina *Instron*. Em frente a ele, o celular que executa a filmagem.

Figura 3.10 – Ambiente de ensaio com filmagem.



FONTE: O autor (2024).

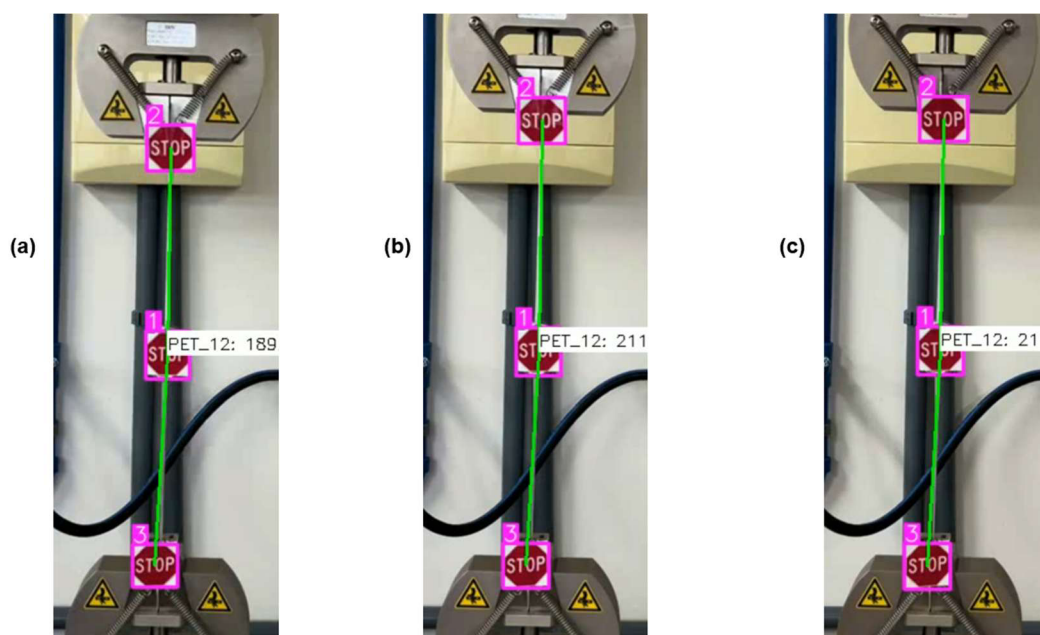
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Esta seção se divide em: apresentação dos resultados preliminares para a validação inicial do código de visão computacional; a validação completa para os ensaios completos do teste de rigidez; e a discussão dos resultados de rigidez das linhas híbridas.

4.1. Resultados preliminares da validação do código de visão computacional

O ensaio preliminar de validação, realizado em um corpo de prova híbrido, teve como objetivo principal verificar a capacidade de rastreamento do sistema. Conforme ilustrado na Figura 4.1, a localização das placas de pare (*tracking*) foi acompanhada ao longo de todo o ensaio. Nota-se um alongamento extremamente sutil entre os itens a (no instante inicial do teste), b (aos 15 minutos do ensaio) e c (ao fim do ensaio) da Figura 4.1. Desde os primeiros vídeos processados, observou-se que a função de rastreamento (*tracking*) era eficaz na identificação das placas *STOP* ao longo do teste. Além disso, a biblioteca YOLO era suficientemente sensível para detectar exitosamente a sutil variação de alongamento sofrida pelos corpos de prova.

Figura 4.1 – Avanço do *tracking* ao longo do ensaio.



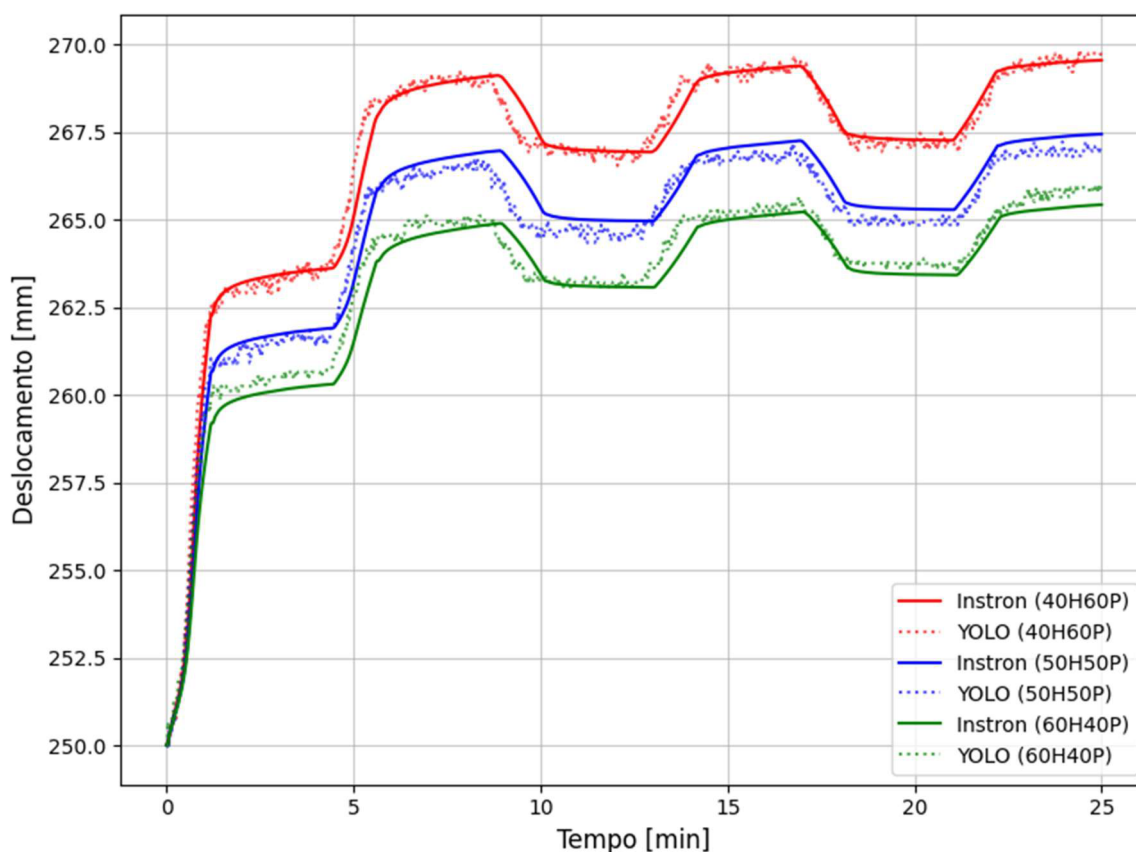
FONTE: O autor (2025).

Quando se observa o deslocamento total do corpo de prova medido pela máquina de ensaio (*Instron* E3000) em comparação ao medido pelo YOLO, é possível identificar similaridade entre os resultados, conforme Figura 4.2. As condições são identificadas como:

- 3 corpos de prova com 40% de HMPE e 60% de PET (40H60P);
- 3 corpos de prova com 50% de HMPE e 50% de PET (50H50P);
- 3 corpos de prova com 60% de HMPE e 40% de PET (60H40P).

Na Figura 4.2, as linhas contínuas apresenta a leitura de deslocamento feita pela máquina de tração (*Instron*) e a pontilhada apresenta a leitura obtida por meio da visão computacional (YOLO). Cabe salientar que a *Instron ElectroPuls* E3000 utiliza um encoder óptico absoluto linear para medir deslocamentos.

Figura 4.2 – Deslocamentos obtidos pela *Instron* e pelo YOLO.



FONTE: O autor (2024).

Aplicou-se sobre os conjuntos de pontos as métricas estatísticas para quantificar a validade dos resultados obtidos pelo código de visão computacional. Como já mencionado, as variáveis calculadas foram: o coeficiente de correlação de Pearson (r); o valor-P; a raiz do erro quadrático médio (RMSE); e o erro médio absoluto (MAE). Os resultados obtidos são expressos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resumo das métricas estatísticas calculadas para as curvas.

	Pearson (r)	Valor-P	RMSE [mm]	MAE [mm]
40% HMPE e 60% PET	0,9931	0,000	0,16239	0,25143
50% HMPE e 50% PET	0,9924	0,000	0,23294	0,40139
60% HMPE e 40% PET	0,9919	0,000	0,22678	0,37000

FONTE: O autor (2024).

Logo, quando se observa as variáveis medidas, constata-se elevado nível de correlação, pois o coeficiente de correlação de Pearson (r) foi superior à 0,99 para todos as condições executadas. Além disso, o valor-P que determina a relevância estatística das amostragens foi zero para todas as condições. Isso indica que a probabilidade da alta correlação demonstrada ser apenas acaso é praticamente nula.

Também, os erros médios calculados foram baixos se comparados aos deslocamentos apresentados no ensaio. O maior erro médio foi obtido na condição 50% de HMPE e 50% de PET (igual a 0,40139 mm). Para um corpo de prova de comprimento inicial de 250 mm que alonga 17,5 mm, esse maior erro médio obtido é notoriamente baixo.

Dessa forma, observa-se que os resultados obtidos pela visão computacional para as condições ensaiadas possibilitam a execução do protocolo de rigidez completo e a implementação da visão computacional para análise das linhas híbridas. Ao analisar em conjunto todas as condições, obtêm-se uma correlação de Pearson média de 0,9925, erro absoluto médio de 0,34094 mm e erro quadrático médio de 0,20737 mm.

4.2. Leituras de alongamento do teste de rigidez por visão computacional

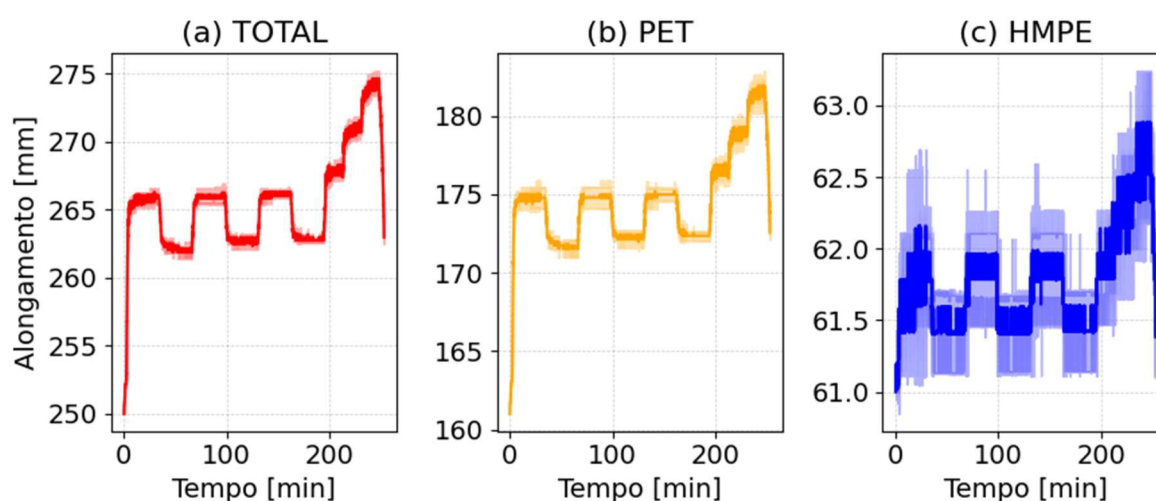
O ensaio principal deste estudo foi o protocolo de rigidez completo adaptado da ISO 18692 (2007), como já descrito. Foram executadas todas as etapas do ensaio, três carregamento quase-estáticos e três carregamentos dinâmicos, a fim de obter a rigidez ao longo dos 253 minutos do teste. Além disso, executou-se todas as sete condições apresentadas na seção de materiais e métodos desse trabalho para três corpos de prova.

Como a visão computacional permite obter o deslocamento integral do corpo de prova, o método de validação previamente apresentado pode ser aplicado aos ensaios completos. Dessa forma, torna-se possível comparar os dados utilizados no cálculo da rigidez com aqueles registrados pela máquina de ensaios.

Dessa forma, é necessário apresentar os resultados obtidos na leitura dos alongamentos do corpo de prova dos ensaios híbridos. Nas Figura 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, apresentam-se as curvas obtidas por visão computacional. Cabe mencionar que a curva média dos três corpos de prova é expressa em uma cor mais saturada, enquanto a seu entorno, com uma cor menos saturada expressa o desvio padrão.

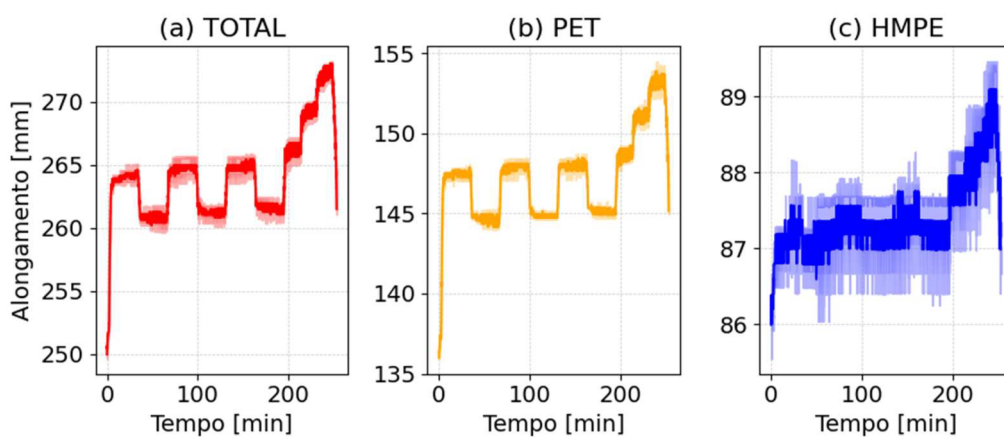
Além disso, identifica-se para cada uma das condições híbridas: o alongamento médio total (item a das figuras); o alongamento médio do PET (item b das figuras); e o alongamento médio do HMPE (item c das figuras).

Figura 4.3 – Alongamentos Total e do PET – Condição 30% HMPE e 70% PET.



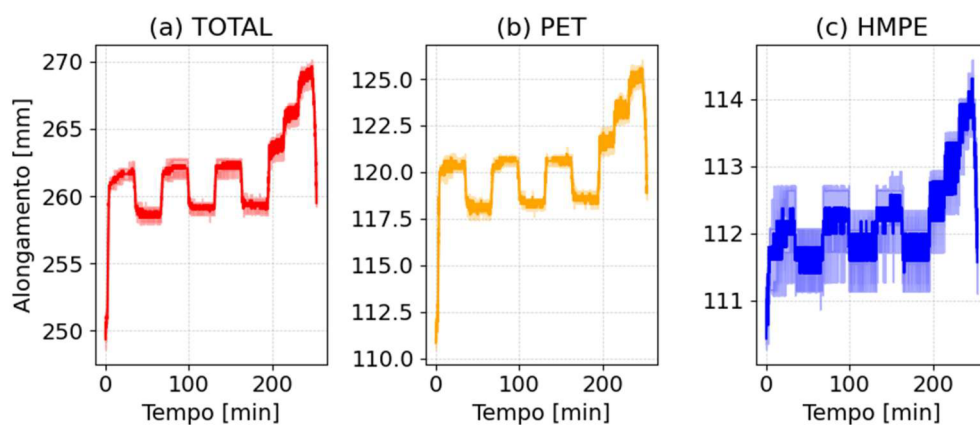
FONTE: O autor (2025).

Figura 4.4 – Alongamentos total e do PET – Condição 40% HMPE e 60% PET.



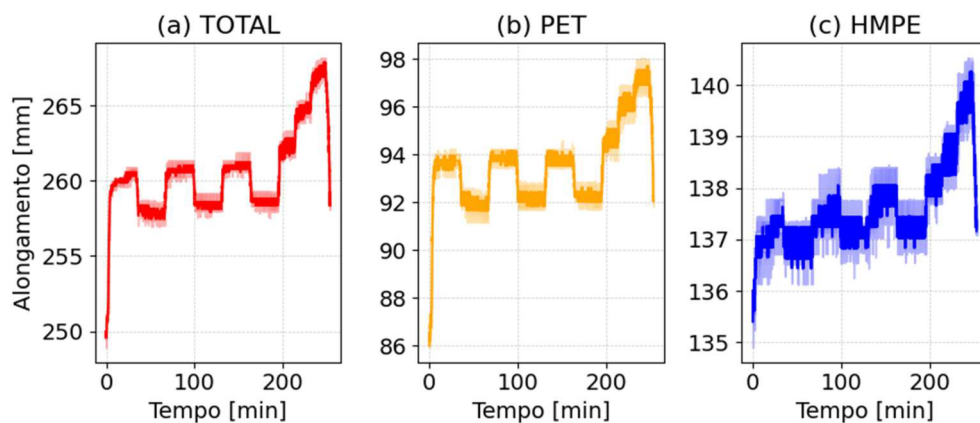
FONTE: O autor (2025).

Figura 4.5 – Alongamento total e do PET – Condição 50% HMPE e 50% PET.



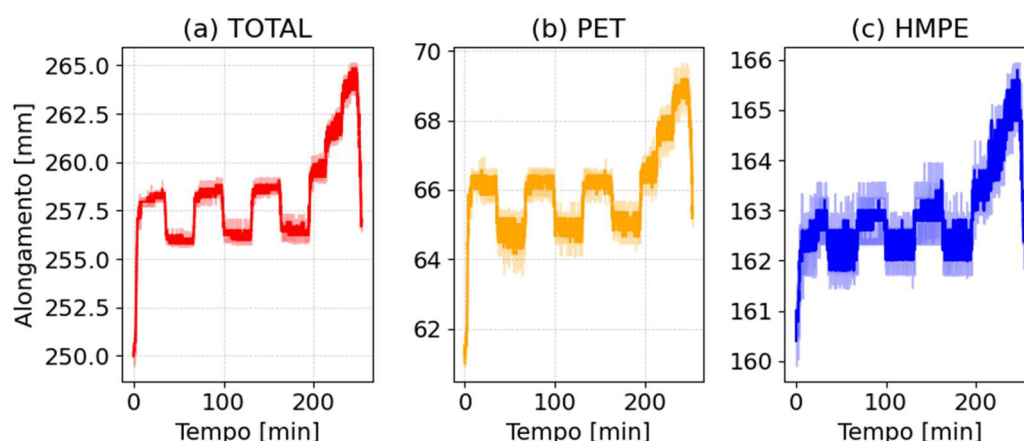
FONTE: O autor (2025).

Figura 4.6 – Alongamento total e do PET – Condição 60% HMPE e 40% PET.



FONTE: O autor (2025).

Figura 4.7 – Alongamento total e do PET – Condição 70% HMPE e 30% PET.

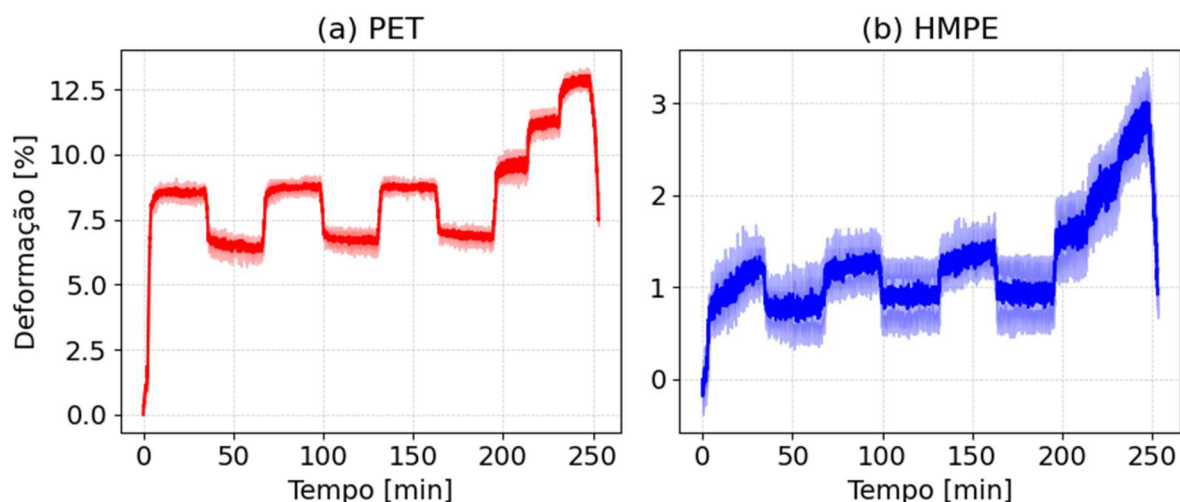


FONTE: O autor (2025).

É possível observar, em todas as condições, um elevado ruído na leitura do PET em comparação à leitura total, e maior ainda na leitura de HMPE. Também, quando se reduz a porcentagem do PET e se aumenta a do HMPE no corpo de prova híbrido, o ruído se torna ainda mais perceptível em todas as leituras. Isso é notório e está associado aos alongamentos menores dos corpos de prova onde o HMPE é predominante. O que indica uma melhor adequação do método de visão computacional para grandes alongamentos.

Por outro lado, apesar do ruído elevado, as leituras de deformação obtidas apresentaram um baixo desvio-padrão. Isso é um indício de a medição por meio de imagens digitalizadas é suficientemente exata para a aplicação, apesar da dificuldade de detecção de alongamentos muito pequenos, como ocorre nos multifilamentos de HMPE. Nas Figuras 4.8(a) e 4.8(b), são apresentadas as deformações médias do PET e do HMPE, respectivamente, para todas as condições juntas. Além disso, a curva média é preenchida com o desvio padrão para cima e para baixo.

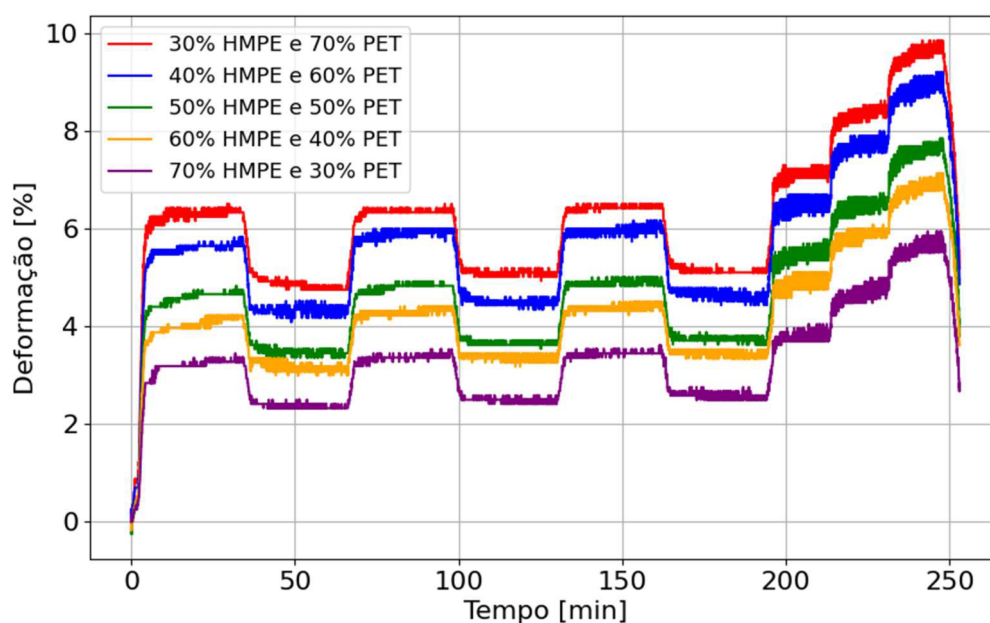
Figura 4.8 – Deformação média do PET e do HMPE para todas as condições.



FONTE: O autor (2025).

Com isso, observa-se que, independentemente da condição híbrida aplicada, não há influência do comprimento do segmento no alongamento da fibra. Esse aspecto vai ao encontro do estimado, pois a deformação é uma característica do material e da geometria, logo, não é esperado que se modifique nesse tipo de aplicação. Por fim, apresenta-se a Figura 4.9 que sintetiza a deformação total dos corpos de prova para todas as condições híbridas ensaiadas.

Figura 4.9 – Deformação total das amostras híbridas.



FONTE: O autor (2025).

Destaca-se aqui também outro comportamento esperado: a sequência das curvas de deformação. Na Figura 4.9, a curva que apresenta menor deformação total é a amostra com menor quantidade percentual da fibra de maior alongamento, o PET. Aspecto esse que se repete nas demais, no qual quanto mais se adiciona PET no corpo de prova, maior é a deformação total dele.

Isso ocorre, pois o alongamento da fibra de HMPE é significativamente inferior à da fibra de PET. Portanto, quanto maior é a proporção de HMPE menor é o alongamento total a linha híbrida em série. Em paralelo, quanto maior a proporção de PET maior é o alongamento total.

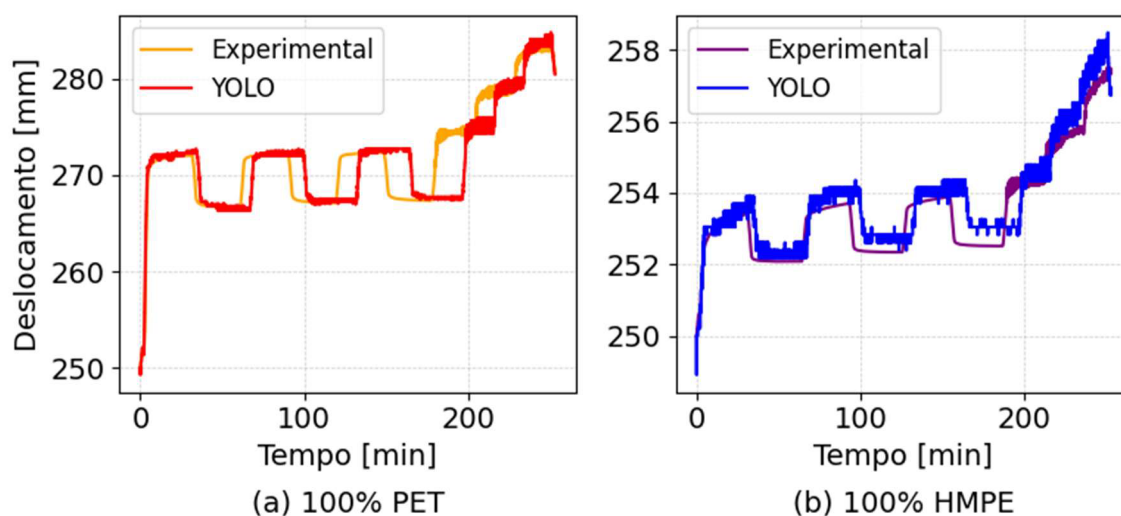
A análise inicial sobre a aplicação da visão computacional demonstra que o método apresenta capacidade para realizar medições dos alongamentos no corpo de prova híbrido. Embora sejam perceptíveis ruídos e dispersões nos resultados, especialmente sob condições de alongamentos similares ao HMPE, ou seja, mais baixos, os resultados indicam potencial de aplicabilidade da técnica.

4.3. Segunda etapa de validação da visão computacional

A fim de garantir a confiabilidade das leituras do código de visão computacional, comparou-se os dados de alongamento total obtidos pela máquina de ensaios aos apresentados na seção anterior (obtidos por meio do YOLO). Trata-se de abordagem equivalente àquela utilizada para validar os ensaios preliminares. Esse passo visa a garantir que os resultados obtidos para o ensaio completo sejam, também, confiáveis.

Na figura 4.10 apresenta-se as curvas de deslocamento obtidas pelo YOLO e obtidas por meio da máquina de ensaios (experimental). É possível observar que a leitura inicia e encerra com alta similaridade, porém ao longo do processamento ocorrem distorções entre os dois métodos de aquisição de dados. Cabe salientar que esses resultados correspondem às condições não-híbridas (simples), realizadas com 100% de HMPE e 100% de PET.

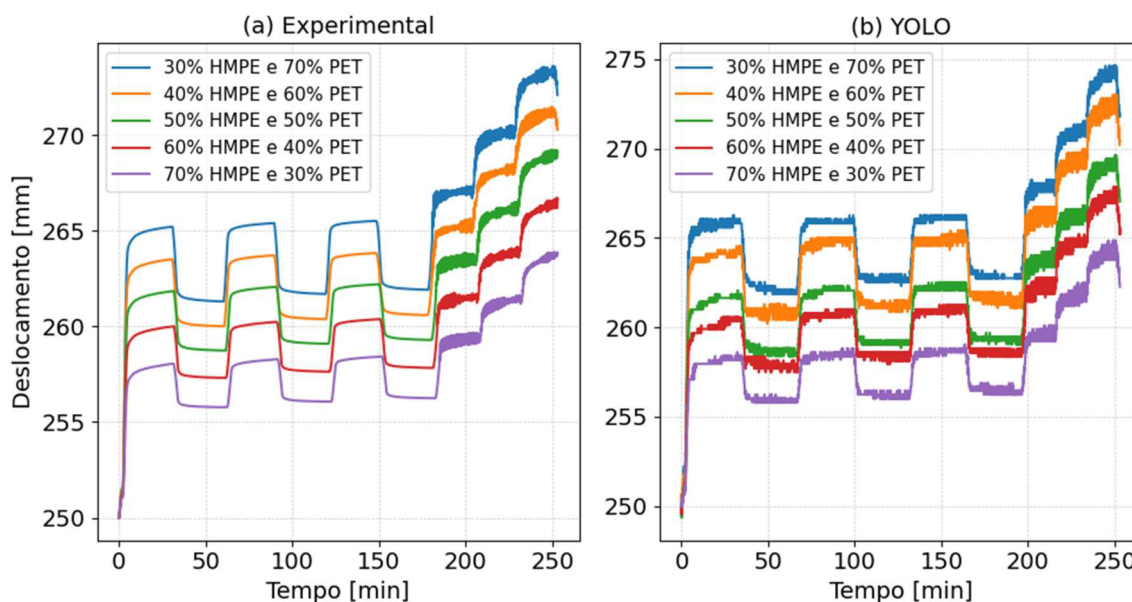
Figura 4.10 – Deslocamentos para as condições simples.



FONTE: O autor (2025).

De forma correlata, apresenta-se na Figura 4.11 as curvas de deslocamento para as condições híbridas. Na Figura 4.11(a), a leitura experimental obtida pela máquina de ensaios e, na Figura 4.11(b), a leitura obtida pela visão computacional.

Figura 4.11 – Deslocamentos para as condições híbridas.



FONTE: O autor (2025).

Além disso, na Tabela 4.2, replica-se o cálculo das métricas estatísticas aplicadas aos ensaios preliminares. No qual, o coeficiente de correlação de Pearson

junto ao valor-P identifica a correlação entre as variáveis medidas e os erros médios absoluto e quadrático identificam a discrepância entre os dados aquisitados.

Tabela 4.2 – Métricas estatísticas aplicadas aos ensaios principais.

	Pearson (r)	Valor-P	RMSE [mm]	MAE [mm]
30% HMPE e 70% PET	0,86477	0,0000	1,96190	1,48803
40% HMPE e 60% PET	0,85976	0,0000	1,93788	1,53693
50% HMPE e 50% PET	0,88392	0,0000	1,51240	0,9046
60% HMPE e 40% PET	0,8945	0,0000	1,32923	1,02423
70% HMPE e 30% PET	0,89689	0,0000	1,06459	0,66469
100% HMPE	0,92969	0,0000	0,63344	0,49718
100% PET	0,86243	0,0000	2,79211	1,76837

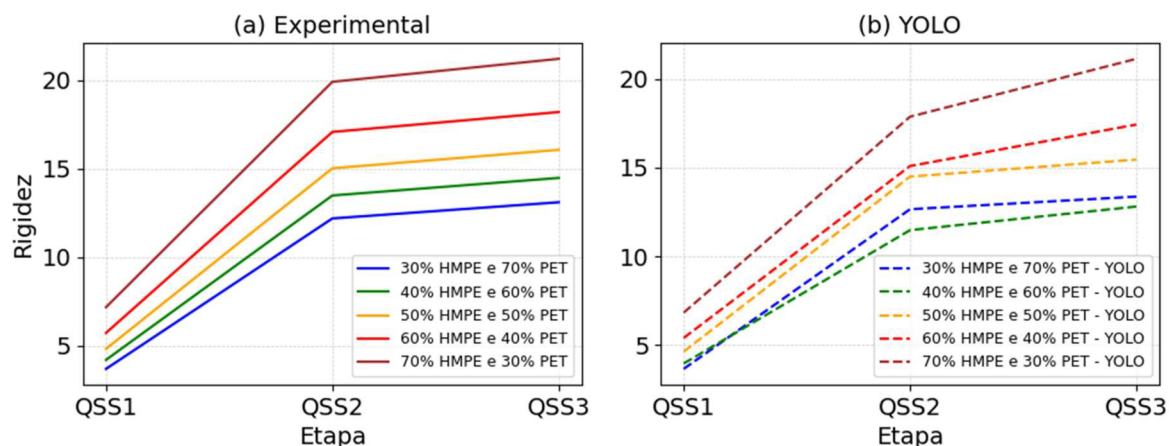
FONTE: O autor (2025).

Nota-se que o coeficiente de correlação de Pearson apresenta uma queda significativa em relação aos ensaios preliminares. O menor valor obtido é aproximadamente 0,86 que é inferior ao menor obtido na validação anterior (0,99). Esse aspecto quantifica o desajuste maior entre as leituras, experimental e por visão computacional, quando feitas em ensaios mecânicos mais longos.

Além disso, observa-se que há erros médios maiores que na validação dos ensaios preliminares. No ensaio de 25 minutos, o maior erro médio obtido foi de, aproximadamente, 0,4 mm, em contraste ao maior erro médio de 2,79 mm do ensaio completo de 253 minutos. Isso demonstra um indício de que a confiabilidade do YOLO é dependente da duração do ensaio realizado, ou seja, quanto maior é o processamento requisitado, menor a qualidade dos resultados obtidos.

Outro aspecto a ser observado é o comportamento da rigidez normalizada para os multifilamentos associados em série, que é calculada a partir da visão computacional e a partir da máquina de ensaio (experimental). Na Figura 4.12, compara-se os resultados de rigidez quase-estática obtidos para ambas leituras.

Figura 4.12 – Comparação entre experimental e YOLO para rigidez quase-estática.

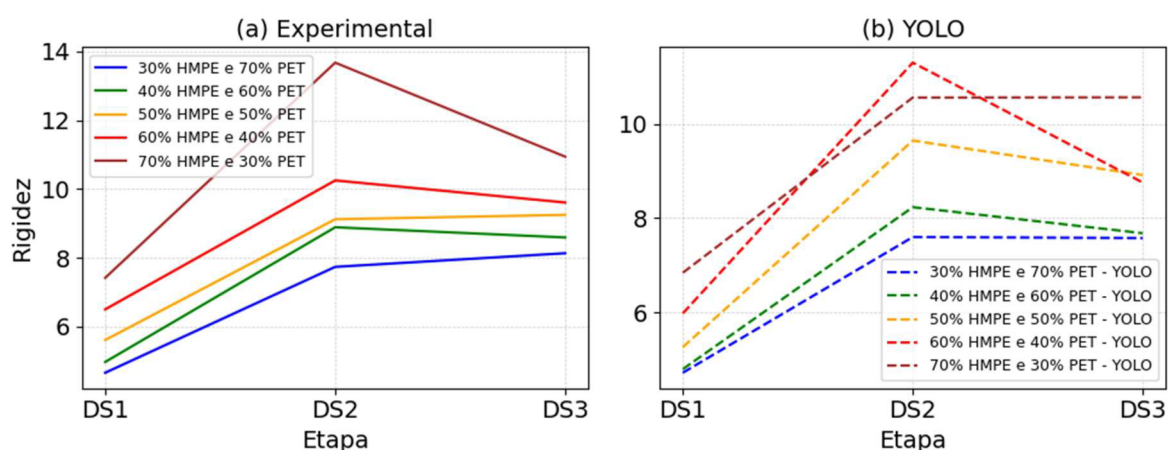


FONTE: O autor (2025).

Apesar da notável similaridade entre os itens (a) e (b) da Figura 4.12, nota-se alguns comportamentos inesperados na evolução da rigidez. Na primeira etapa, chamada de QSS1, a ordem das rigidezes está correta, porém entre QSS1 e QSS2 há uma inversão entre a curva “30% HMPE e 70% PET” e a curva “40% HMPE e 60% PET”. Essa ocorrência indica alguma falha de leitura entre as condições, pois a linha que possui maior alongamento (por ter mais quantidade de PET) não deveria assumir maior rigidez que a linha que possui menor alongamento (por ter menos quantidade de PET).

Já para as condições de rigidez dinâmica, os resultados obtidos de forma experimental e obtidos por meio de visão computacional apresentam-se nas Figuras 4.13(a) e 4.13(b), respectivamente.

Figura 4.13 – Comparação entre experimental e YOLO para rigidez dinâmica.

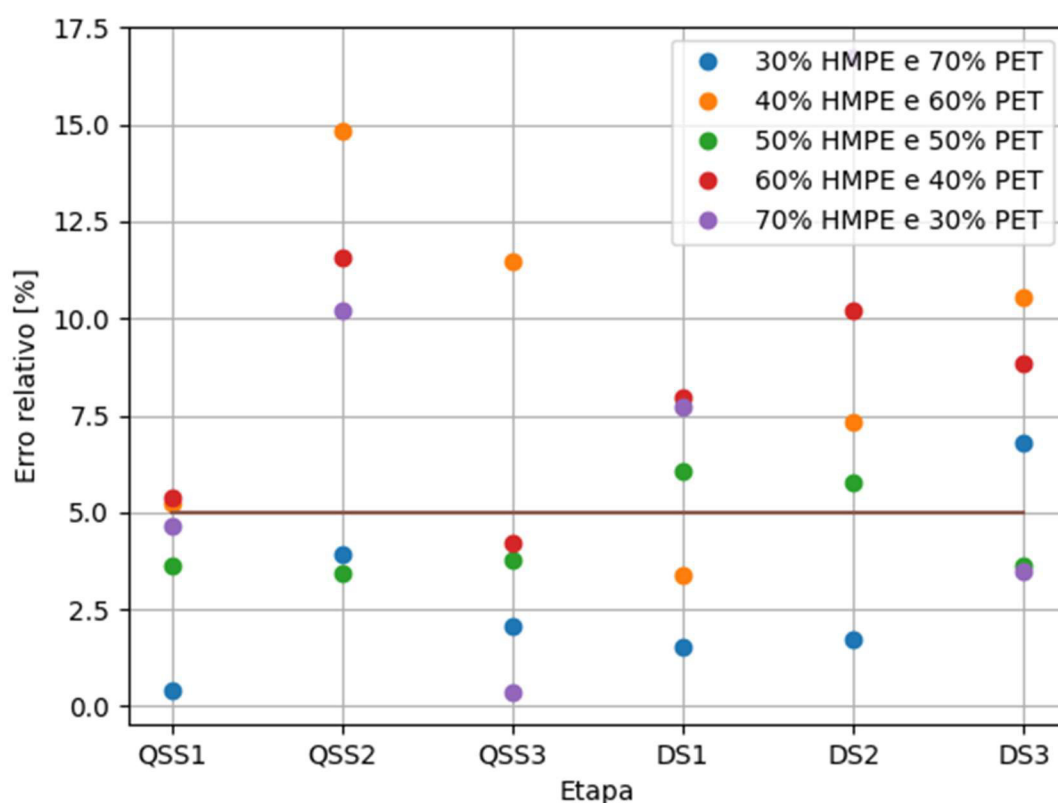


FONTE: O autor (2025).

Percebe-se na rigidez dinâmica, também, a ocorrência de uma inversão entre as curvas, algo inesperado. A curva “70% HMPE e 30% PET” assume um valor de rigidez mais baixo que a curva “60% HMPE e 40% PET”. Esse ocorrido além de não ser esperado, não se confirma na leitura feita pela máquina de ensaios no gráfico experimental.

Por fim, observa-se o comportamento do erro relativo percentual de cada uma das etapas do teste de rigidez (QSS1, QSS2, QSS3, DS1, DS2 e DS3) para cada uma das condições híbridas apresentadas. Esse cálculo de erro é apresentado na Figura 4.14.

Figura 4.14 – Erro relativo para as condições híbridas.



FONTE: O autor (2025).

Nesse aspecto, fica nítida a alta dispersão dos resultados e a incidência de um considerável erro aleatório presente nos resultados de rigidez. Isso ocorre devido ao fato de a equação prevista para o cálculo desses valores de rigidez ser em função da variação de alongamento em cada etapa, variações estas muito sutis. Dessa forma, a pequena imprecisão que se obtém nos alongamentos, se torna uma grande variação para a rigidez.

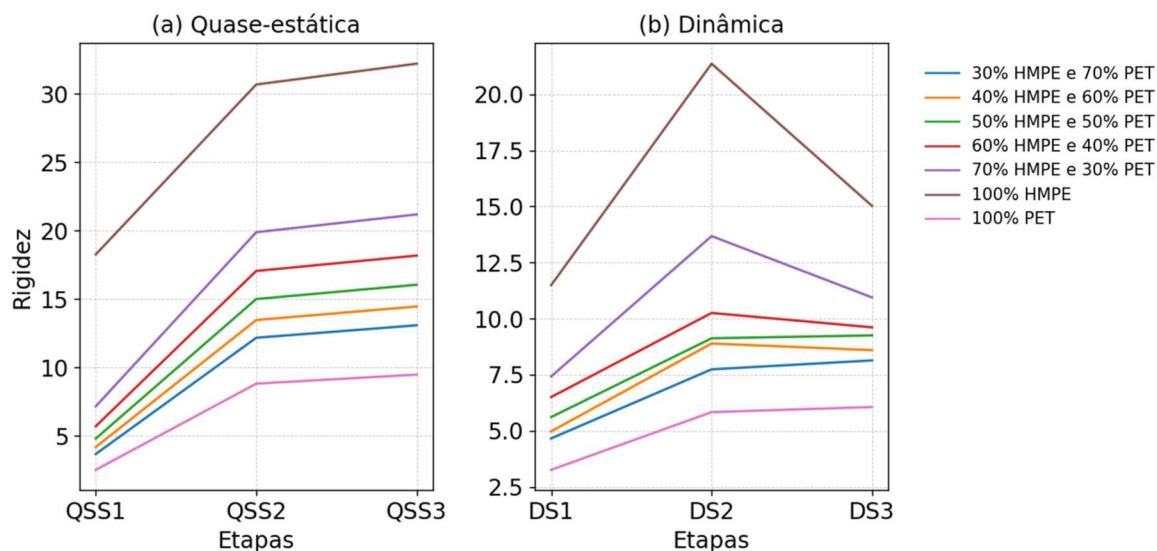
Caso coloque-se 5% como um limite máximo de erro relativo, observa-se que quase metade das leituras obtidas para a rigidez foi superior a esse erro. Isso indica que, apesar das leituras de alongamentos serem bem próximas ao referencial, a utilização desses resultados para calcular a rigidez da fibra é imprecisa.

4.4. Resultado geral de rigidez da linha híbrida

Quando se observa a linha híbrida (multifilamentos de diferentes materiais associados em série), é possível notar que não há uma proporcionalidade entre a

rigidez total da linha e a variação da quantidade das fibras, HMPE e PET. Na Figura 4.15 é apresentados os resultados obtidos experimentalmente.

Figura 4.15 – Rigidez experimental das linhas simples e híbridas.



FONTE: O autor (2025).

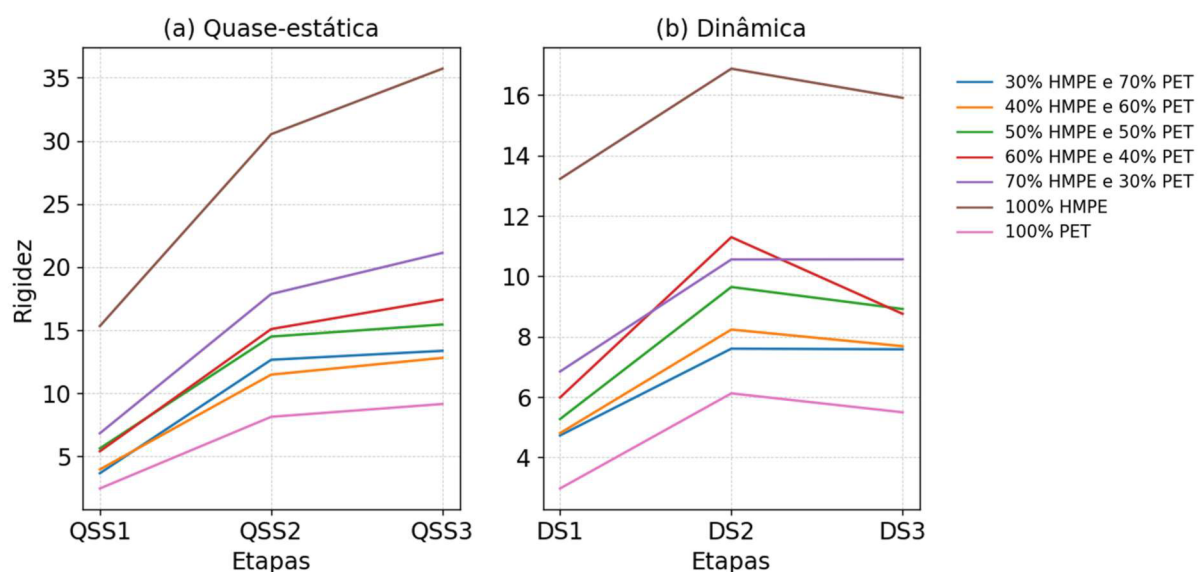
Os valores de rigidez quase-estática apresentados pela linha simples de HMPE são notoriamente mais altos que todas as condições híbridas. Porém, quando se adiciona PET à linha, percebe-se um decréscimo significativo nesses valores de rigidez. Isso indica que ao adicionar uma pequena quantidade de PET à linha de amarração, atinge-se uma condição de baixo alongamento (devido a predominância do HMPE), porém com uma rigidez total da linha bastante inferior a condição de 100% de HMPE.

Por outro lado, na Figura 4.15(b), no qual são expostos os valores de rigidez dinâmicas para as condições tanto simples quanto híbridas, é possível notar que uma linha simples de HMPE apresenta um pico acentuado de rigidez na segunda etapa (DS2), característica esta que não ocorre na linha simples de PET. Também se percebe que há uma transição suave nas condições híbridas, em que, quanto mais predominante o HMPE é na linha híbrida, mais ela se assemelha à linha simples de HMPE. O mesmo ocorre com o PET, conforme mais predominante o PET é na linha híbrida, mais ela se assemelha ao comportamento da linha simples de PET.

Ao observar a rigidez dinâmica na Figura 4.15(b), nota-se que a condição híbrida que mais se assemelha à linha simples de 100% de HMPE é a curva “70% HMPE e 30% PET”. Em ambas ocorre um pico de rigidez na segunda etapa (DS2), porém, na condição híbrida, este pico é muito menos acentuado do que na condição simples. Além disso, os patamares de rigidez dessa condição híbrida são bem inferiores aos patamares de rigidez encontrado na simples de HMPE. Isso sublinha o fato de o PET, mesmo em pequenas quantidades na linha híbrida, reduzir significativamente os valores totais de rigidez da linha.

De forma análoga, apresenta-se na Figura 4.16, os valores de rigidez quase-estáticas e dinâmicas das linhas simples e híbridas obtidas por meio de visão computacional. A fim de comparar os dados obtidos das duas formas, experimental e pelo YOLO, quando aplicados a equação de rigidez (Equação 3.3).

Figura 4.16 – Rigidez YOLO das linhas simples e híbridas.



FONTE: O autor (2025).

Inicialmente, observa-se uma correlação significativa entre os dois métodos de aquisição de dados. Ainda que haja uma imprecisão no cálculo da rigidez das condições híbridas, devido às inversões inesperadas já discutidas, observa-se que a comparação com o comportamento da linha simples é equivalente. Por meio da visão computacional, é possível observar que a rigidez das linhas híbridas se aproxima em maior grau da condição simples de PET, o que reitera que o PET, mesmo em pouca quantidade, causa significativa variação da rigidez total da linha.

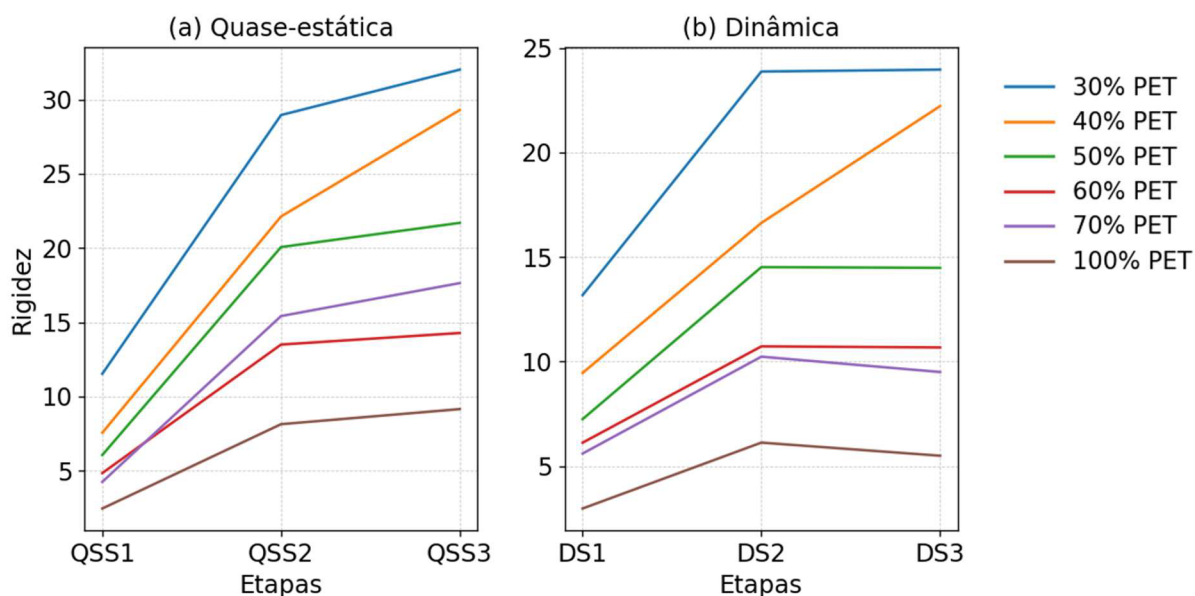
Isso gera uma linha híbrida com o alongamento baixo, devido à predominância de HMPE, porém de baixa rigidez devido ao impacto do PET sobre a condição híbrida.

4.5. Resultados de rigidez dos componentes da linha híbrida

As análises das linhas híbridas feitas até aqui se restringiram a observar o comportamento de rigidez total da linha. Porém, com o uso da visão computacional aplicada ao ensaio, é possível expressar o comportamento individual de cada fibra em relação à evolução da rigidez ao longo do teste.

Cabe salientar que nesta seção os resultados são apenas obtidos por meio do código de visão computacional, o que torna a análise menos robusta, devido ao fato de se tratar de um método não consolidado. Conforme já discutido, o método possui algumas limitações quanto à sensibilidade da leitura, a qual quando aplicada ao cálculo de rigidez pode gerar distorções significativas. Com isso, esta seção visa a apresentar os resultados obtidos para cada fibra e comparar de forma geral o comportamento das condições híbridas com as condições simples, mesmo que de forma qualitativa. Na Figura 4.17, apresenta-se a análise da rigidez para o PET.

Figura 4.17 – Rigidez individual do PET por meio do YOLO.

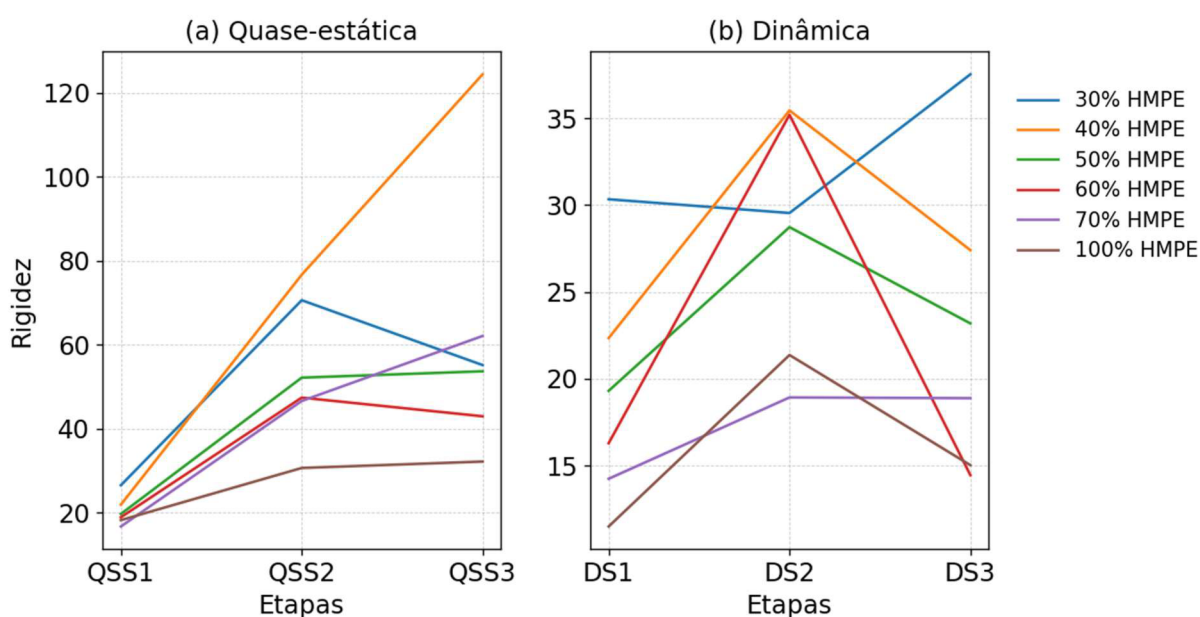


FONTE: O autor (2025).

Quando se compara o comportamento do PET numa linha simples e em condições híbridas junto ao HMPE, observa-se uma alta similaridade de comportamento, visto que conforme se reduz a quantidade de PET presente na linha, maior é a rigidez da fibra no desenvolvimento do teste.

Na Figura 4.18, apresenta-se a evolução da rigidez do HMPE no teste completo, tanto para as condições simples quanto para as híbridas.

Figura 4.18 – Rigidez individual do HMPE por meio do YOLO.



FONTE: O autor (2025).

Observa-se que, em ambos os materiais, as leituras geradas por visão computacional proporcionaram variações inesperadas nos valores de rigidez. Contudo, no caso do HMPE, tais alterações foram de grande magnitude, pois os valores medidos de alongamento, muito pequenos e próximos à resolução do método de medição, apresentam nível de erro significativo, cujo impacto sobre a rigidez se revela na Figura 4.18. Isso ocorre, pois as leituras de deslocamento do HMPE já demonstravam ter maior ruído e maior desvio padrão. Essas distorções nas leituras de deslocamento para o HMPE, quando aplicadas ao cálculo de rigidez, tornam os resultados obtidos inconclusivos.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho percorreu dois temas fundamentais: a rigidez de dois materiais sintéticos associados em série e a utilização de visão computacional para instrumentação de ensaio mecânico. Ambas as temáticas interagiram na pesquisa, pois a visão computacional foi utilizada para obter os alongamentos individuais das fibras, visto que a máquina de ensaio fornece apenas o alongamento total.

Dessa forma, ao observar o objetivo geral estabelecido:

“[...] analisar o comportamento mecânico de uma linha de amarração híbrida em série de Polietileno Tereftalato (PET) e Polietileno de Alto Módulo (HMPE) por meio de teste de rigidez e utilizar visão computacional como método de leitura dos alongamentos totais e parciais do corpo de prova híbrido.” (Capítulo 1 dessa dissertação)

é possível identificar que o trabalho atendeu aos dois tópicos. Foram executados testes de rigidez para cinco condições híbridas propostas, bem como as condições simples de PET e HMPE. O ensaio foi filmado, processado por meio do código de visão computacional desenvolvido e os resultados de alongamento obtidos foram expostos. Porém, apenas o alongamento total obtido pode ser comparado ao único alongamento fornecido pela *Instron* E3000, a máquina de ensaios utilizada.

Além disso, a revisão dos sistemas de amarração e dos métodos de análise correspondentes foi definida como o primeiro objetivo específico. Essa etapa foi efetuada e resultou na escolha do teste de rigidez normatizado pela ISO 18692 (2007) como o método mais apropriado para entender o comportamento mecânico de uma linha híbrida.

O desenvolvimento de um código de visão computacional para processamento dos ensaios mecânicos foi a parte mais desafiadora do trabalho, por se tratar de uma área de desenvolvimento recente e com pouca exploração científica. Diversos métodos distintos foram testados e, por fim, a biblioteca YOLO foi selecionada para ser aplicada ao presente trabalho. Foram processados 395 GB de vídeos em resolução HD (*High Definition* 1080 por 720 *pixels*), com duração total de mais 88 h de vídeo, com o intuito de obter os deslocamentos por visão computacional.

A validação do código de aquisição de deslocamentos por visão computacional utilizando a leitura da máquina de ensaios foi efetuada por meio do ensaio mecânicos preliminares, por simplicidade. Os resultados inicialmente positivos motivaram a aplicação da biblioteca YOLO nos testes de rigidez completos. Além disso, a validação foi executada por meio de diferentes métricas estatísticas, e incluíram: correlação de Pearson; erro médio absoluto; erro médio quadrático; e erro relativo.

Observou-se que o código de visão computacional, embora tenha apresentado bons resultados preliminares (teste de 25 minutos), produziu resultados de qualidade significativamente inferior quando aplicado a testes mais longos (teste de 253 minutos). Ainda, descobriu-se que a imprecisão dos resultados de alongamento produzidos por visão computacional, quando aplicados ao cálculo de rigidez, geravam resultados ainda mais imprecisos. No caso da rigidez individual do HMPE, tal nível de imprecisão, tornou impraticável qualquer conclusão de seus resultados.

Com isso, apesar da visão computacional ser um método bastante promissor e com muita aplicabilidade, a versão utilizada nesse trabalho não apresentou resposta sensível o suficiente para ter validade técnica. Outro aspecto que pode ter impactado a falta de sensibilidade da aquisição dos alongamentos foi a resolução limitada da câmera utilizada. A filmagem em maiores resoluções disponíveis (*FullHD* ou 4K) pode incrementar significativamente a capacidade de leitura por visão computacional.

A interpretação de seus resultados sem o auxílio da leitura da máquina seria, atualmente, inviável e de baixa confiança. Portanto, é necessário melhorar a aquisição de dados por visão computacional ou ainda utilizar uma câmera de maior resolução.

Na análise da linha híbrida, o principal achado deste trabalho é que a adição de uma pequena porção de PET é capaz de conferir à linha de amarração características que:

- Possui baixo alongamento, pois o material predominante é o HMPE que restringe a deformação total da linha;
- Possui uma rigidez muito inferior a uma linha composta unicamente de HMPE, e promove assim uma melhor absorção de energia de impacto, por exemplo.

Além disso, a adição de porções de PET à linha de amarração híbrida também controla a oscilação da rigidez dinâmica. Pois, numa linha simples de HMPE percebe-se um pico de rigidez na segunda etapa que é significativamente atenuado com a pequena adição PET (condição 70% HMPE e 30% PET).

Dessa forma, este trabalho contribui tanto para o entendimento do comportamento mecânico de linhas híbridas quanto para a aplicação de métodos não convencionais de instrumentação em ensaios. Os resultados obtidos reforçam que a combinação de materiais com propriedades distintas pode ser utilizada estrategicamente para ajustar a resposta mecânica de sistemas de amarração, e permitir o equilíbrio entre rigidez, alongamento e dissipação de energia. Ao mesmo tempo, destaca-se que, embora a visão computacional represente uma ferramenta promissora para esse tipo de análise, sua implementação prática ainda requer aprimoramentos significativos em termos de precisão e robustez. Assim, os achados aqui apresentados oferecem subsídios relevantes para futuros estudos que busquem otimizar tanto os materiais utilizados em linhas híbridas quanto os métodos de instrumentação digital aplicados a ensaios mecânicos.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aplicar a biblioteca YOLO utilizando diferentes *tags*: nesse trabalho utilizou-se apenas placas de pare, porém existem outras classes detectáveis que podem facilitar o trabalho de rastreamento de objetos.
- Utilizar e comparar outras ferramentas de visão computacional: existem atualmente um grande número de bibliotecas para a detecção de objetos disponíveis ao público, dessa forma, aplicar a metodologia desse trabalho para comparar a respostas de diferentes ferramentas de visão computacional pode gerar resultados complementares.
- Treinar uma ferramenta de visão computacional para reconhecer o ensaio em materiais sintéticos: substituir as classes existentes pelo treinamento específico dos elementos que compõem o ensaio, como as garras, o corpo de prova, o elo de corrente.
- Avaliar linhas híbridas por meio de outros ensaios mecânicos: nesse trabalho, focou-se em utilizar o teste de rigidez para entender o comportamento mecânico de dois materiais distintos associados em série, pode-se adotar outros testes para avaliar, também, esse comportamento.
- Utilizar diferentes associações: substituir a associação em série que é o foco desse trabalho por uma associação em paralelo ou, ainda, mista.

REFERÊNCIAS

a. Referências nominais:

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. **Guidance notes on the application of fiber rope for offshore mooring**. Houston: ABS, 2019.

Ansari, S. (2020). Industrial Application: Real-Time Defect Detection in Industrial Manufacturing (pp. 361–387). Apress, Berkeley, CA. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5887-3_9.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D1577-01: Standard Test Methods for Linear Density of Textile Fibers**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2001.

Baldner, F. de O., Costa, P. B., Gomes, J. F. S., & Leta, F. R. (2020). A Review on Computer Vision Applied to Mechanical Tests in Search for Better Accuracy (pp. 265–281). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9806-3_9

BIRD, R. B.; ARMSTRONG, R. C.; HASSAGER, O. **Dynamics of Polymeric Liquids**. Volume 1: Fluid Mechanics. 2nd ed. New York: Wiley, 1987.

Bolzon, G. (2015). Experimental and computing strategies in advanced material characterization problems. 1684,030001. <https://doi.org/10.1063/1.4934285>

Bureau Veritas. **Certification of Fibre Ropes for Deepwater Offshore Service**. Guidance Note NI 432 DTO R01E: Paris, France, 2007.

Casey, N. F., & Banfield, S. J. (2002, May). Full-scale fiber deepwater mooring ropes: advancing the knowledge of spliced systems. In **Offshore Technology Conference**. OnePetro.

Chen, T. Y.-F., Dang, N. M., Wang, Z.-Y., Chang, L.-W., Ku, W.-Y., Lo, Y.-L., & Lin, M.-T. (2021). Use of Digital Image Correlation Method to Measure Bio-Tissue Deformation. *THE Coatings*, 11(8), 924. <https://doi.org/10.3390/COATINGS11080924>

Cheng, X., Ma, Q., Zhou, S., Guo, L., & Ma, S. (2024). Using Unsupervised Learning Based Convolutional Neural Networks to Solve Digital Image Correlation. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4821801>.

Colak, O. U., & Dusunceli, N. (2006). Modeling Viscoelastic and Viscoplastic Behavior of High Density Polyethylene (HDPE). **Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of The Asme**, 128(4), 572–578. <https://doi.org/10.1115/1.2345449>.

CREMA, F. L. Análise viscoelástica não-linear de componentes poliméricos com elementos finitos. 129 f. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

DA CRUZ, D. M.; HENDRIKS, S.; ZANGALLI, L. B.; BARRETO, M. A.; CLAIN, F. M.; GUILHERME, C. E. M. Creep-Life Prediction Through Mathematical Parametrization in Low Creep HMPE Fibers for Offshore Mooring. **Anais da OCEANS** **2024**, Halifax, Canadá, 2024. DOI: 10.1109/OCEANS55160.2024.10754299.

DA CRUZ, Daniel Magalhães; STUMPF, Felipe Tempel; VASSOLER, Jakson Manfredini; GUILHERME, Carlos Eduardo Marcos. Assessment of the effects of UV-A exposure on the mechanical strength of offshore mooring multifilaments. **Acta Polytechnica**, Praha, v. 64, n. 6, p. 487–500, 7 jan. 2025. DOI: 10.14311/AP.2024.64.0487.

Davies, P., LeChat, C., Bunsell, A., Piant, A., Franois, M., Grosjean, F., ... & Moysan, A. G. (2008, May). Deepwater Mooring With High Stiffness Polyester and PEN Fiber Ropes. In **Offshore Technology Conference**. OnePetro.

DEL VECCHIO, C.; BIASOTTO, P. Life extension of mooring systems – a structured approach. In: **OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE BRASIL**, 3., 29–31 out. 2019, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Offshore Technology Conference Brasil, 2019. Paper OTC-29918-MS. DOI: 10.4043/29918-MS.

Dwivedi, U. K., Joshi, K., Shukla, S. K., & Rajawat, A. S. (2024). An Overview of Moving Object Detection Using YOLO Deep Learning Models. 1014–1020. <https://doi.org/10.1109/icdt61202.2024.10489800>.

EVANS, J. J.; RIDGE, I. M. L. Rope and rope-like structures. **WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering**, v. 20, 2005.
Fonseca, M. M. (2019). **Arte Naval-Volume 1**. Marinha do Brasil.

François, M., & Davies, P. (2008). Characterization of Polymers Mooring Lines.(Vol., pp. 169–177). In **ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, Estoril, Portugal.

Gdoutos, E. E. (2022). Digital Image Correlation (DIC). 251–259. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89466-5_12.

Hirse Korn, M., Petitjean, F., & Deramecourt, A. (2008). Nonlinear Viscoelastic and Viscoplastic Behavior of PET-Based Multi-Layer Polymeric Films Used in Super-Pressure Balloon Envelopes. 1027, 363–365. <https://doi.org/10.1063/1.2964692>.

Hussain, M. (2023). YOLO-v1 to YOLO-v8, the Rise of YOLO and Its Complementary Nature toward Digital Manufacturing and Industrial Defect Detection. *Machines*, 11(7), 677. <https://doi.org/10.3390/machines11070677>.

ISO. **ISO 18692:2007 – Fibre ropes for offshore stationkeeping — Polyester**. Geneva: International Organization for Standardization, 2007.

KOLOOR, S. S. R.; KARIMZADEH, A.; ABDULLAH, M. R.; PETRU, M.; YIDRIS, N.; SAPUAN, S. M.; TAMIN, M. N. Linear-Nonlinear Stiffness Responses of Carbon

Fiber-Reinforced Polymer Composite Materials and Structures: A Numerical Study. **Polymers**, Basel, v. 13, n. 3, art. 344, 2021. DOI: 10.3390/polym13030344.

LIN, Z.; SAYER, P. An enhanced stiffness model for elastic lines and its application to the analysis of a moored floating offshore wind turbine. **Ocean Engineering**, v. 109, p. 444–453, 2015. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.09.002.

MA, Kai-Tung et al. **Mooring system engineering for offshore structures**. Gulf Professional Publishing, 2019.

MARTIN, Tobias; BIHS, Hans. A Numerical Solution for Modelling Mooring Dynamics, Including Bending and Shearing Effects, Using a Geometrically Exact Beam Model. **Journal of Marine Science and Engineering**, Basel, v. 9, n. 5, art. 486, 2021. DOI: 10.3390/jmse9050486.

MCKENNA, Henry A.; HEARLE, John William Stanley; O'HEAR, Nick. **Handbook of fibre rope technology**. Woodhead publishing, 2004.

Monteiro, B. F., Baioco, J. S., Albrecht, C. H., Lima, B. S. L. P. de & Jacob, B. P. (2021). Optimization of mooring systems in the context of an integrated design methodology. *Marine Structures*, 75, 102874. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102874>.

MORETTIN, Pedro Alberto; BUSSAB, Wilton O. Estatística básica. Editora Saraiva. 8ª edição. São Paulo, 2013.

MORAIS, José Mauro de; CAETANO FILHO, Elísio (revisor técnico). **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/1147>. Acesso em: 4 ago. 2024.

Pan, N. and Brookstein, D. (2002), Physical properties of twisted structures. II. Industrial yarns, cords, and ropes. **J. Appl. Polym. Sci.**, 83: 610-630. <https://doi.org/10.1002/app.2261>.

Pan, B. Wang, Y., Gu, Y., & Zhang, Z. (2017). Non-contact video measuring system for strain measurement and mechanical property characterization of carbon fiber multifilament.

Pascual, G., Kim, B., Hong, M., Lee, K., Li, Y. V., & Hendrickson, D. A. (2016). Topography, Phase Imaging, and Mechanical Property Investigation of Polyester Yarn Interaction with Silicone Gel Matrix. *Microscopy Today*, 24(6), 32–37. <https://doi.org/10.1017/S1551929516000936>.

Prakash, I. V., & Palanivelan, M. (2024). A Study of YOLO (You Only Look Once) to YOLOv8 (pp. 257–266). Informa. <https://doi.org/10.1201/9781003529231-40>

RAMZANPOOR, Iman; NUERNBERG, Martin; TAO, Longbin. Coupled aero-hydro-servo-elastic analysis of 10MW TLB floating offshore wind turbine. **Journal of**

Ocean Engineering and Science, v. 10, n. 1, p. 29–58, 2025. DOI: 10.1016/j.joes.2023.02.001.

Ray, D. (2024). Material Type Prediction Using Machine Learning Techniques. *International Journal of Science and Research*. <https://doi.org/10.21275/sr24212155231>.

Reyes, K. G., & Maruyama, B. (2019). The machine learning revolution in materials. *Mrs Bulletin*, 44(7), 530–537. <https://doi.org/10.1557/MRS.2019.153>

TSOBKALLO, E. S.; TIRANOV, V. G.; GROMOVA, E. S. Effect of the Level of Preliminary Deformation on the Stiffness of Synthetic Fibres. **Fibre Chemistry**, Moscou, v. 33, n. 3, p. 215–219, maio 2001. DOI: 10.1023/A:1012325820164.

ULTRALYTICS. **Ultralytics | Revolutionizing the World of Vision AI**. Disponível em: <https://www.ultralytics.com>. Acesso em: 4 jan. 2025.

Wang, T. Y., Yang, L. J., Xu, Z. G., & Liu, J. K. (2013). Design and Comparison of Catenary and Taut Mooring Systems for New Concept FPSO IQFP in Shallow Waters. **Applied Mechanics and Materials**, 2670–2675. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.353-356.2670>.

Wang, Y., & Zhou, C. (2024). Unsupervised CNN-based DIC method for 2D displacement measurement. *Optics and Lasers in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2023.107981>.

Ward, J. C., Hallowell, S. T., Kim, N., & Viselli, A. (2024). Comparison of FEED Level Design and Performance of Chain Catenary and Synthetic Mooring Systems for a 10+ MW Floating Offshore Wind Turbine. <https://doi.org/10.4043/35194-ms>.

WELLER, S. D.; JOHANNING, L.; DAVIES, P.; BANFIELD, S. J. Synthetic mooring ropes for marine renewable energy applications. **Renewable Energy**, v. 83, p. 1268–1278, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.028>.

Weller, S. D., Davies, P., Vickers, A. W., & Johanning, L. (2014). Synthetic rope responses in the context of load history: Operational performance. **Ocean Engineering**, 83, 111-124.

Wen, R. K., Tao, C., Ji, H., & Qiu, J. (2024). Classification, Localization and Quantization of Eddy Current Detection Defects in CFRP Based on EDC-YOLO. *Sensors*, 24(20), 6753. <https://doi.org/10.3390/s24206753>.

Wildel, B., Kelly, P., Librino, F., & Whitehill, A. S. (1996). Conceptual Design and Comparison of Aramid and Polyester Taut Leg Spread Moorings for Deepwater Applications. <https://doi.org/10.4043/8145-MS>.

Winkler, M. M., & McKenna, H. A. (1995). The Polyester Rope Taut Leg Mooring Concept: A Feasible Means For Reducing Deepwater Mooring Cost and Improving Stationkeeping Performance. <https://doi.org/10.4043/7708-MS>.

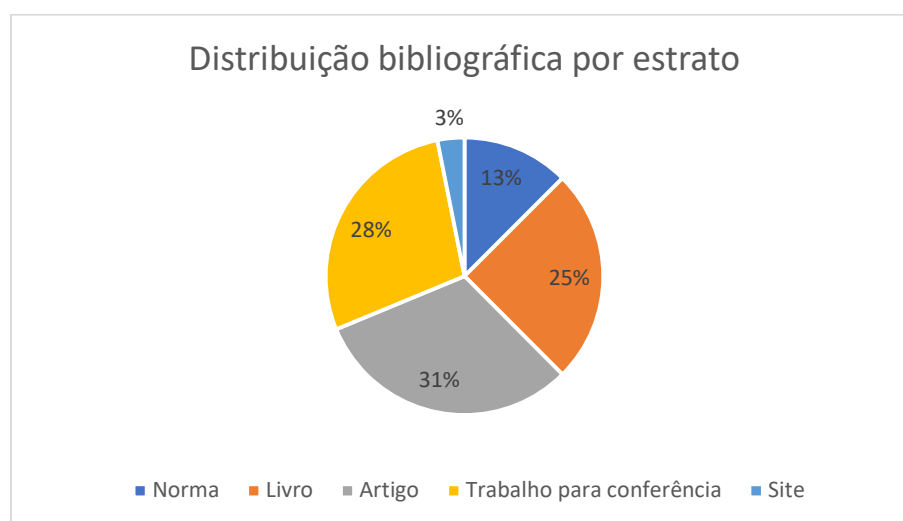
Yang, R., Shaw, A., Li, Y., Zeng, D., & Guo, P. (2021). Deep DIC: Deep Learning-Based Digital Image Correlation for End-to-End Displacement and Strain Measurement. arXiv: Image and Video Processing. <https://dblp.unitrier.de/db/journals/corr/corr2110.html#abs-2110-13720>.

Xu, H., Wang, W., Liu, Y., & Zou, L. (2024). Surface Defect Detection of Aluminum Sheet Based on CS-YOLO Algorithm. <https://doi.org/10.1109/ainit61980.2024.10581430>.

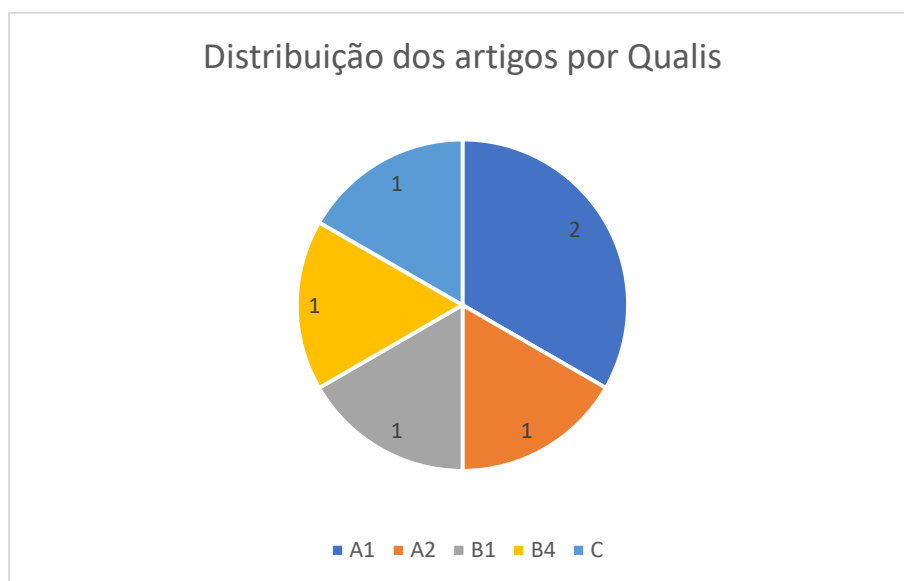
Zhu, C., Wang, H., Kaufmann, K., & Vecchio, K. S. (2019). Computer Vision Approach to Study Deformation of Materials. arXiv: Computational Physics. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/AB65D9>.

Zhu, J., Cao, Y., & Zhang, L. (2021). Comparative Analysis and Differential Study on Dynamic Response of Tension Type Mooring and Catenary Mooring System. 809(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/809/1/012017>.

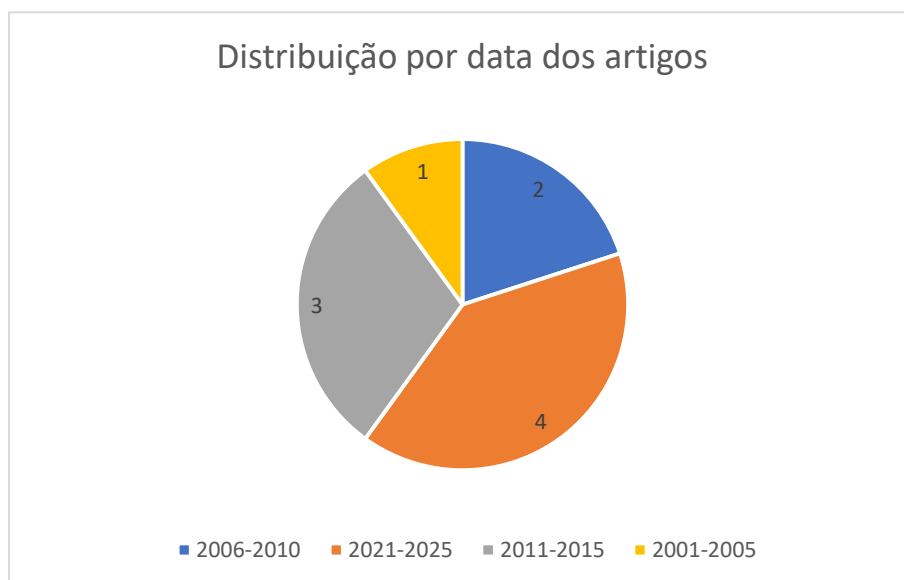
b. Referências por estrato



c. Referências por Qualis



d. Referências por data dos artigos



APÊNDICE

Equações utilizadas para cada rigidez:

$QSS1 = \frac{\frac{F2 - F1}{YBL}}{\frac{L2 - L1}{L0}}$	$QSS2 = \frac{\frac{F2 - F1}{YBL}}{\frac{L2 - L1}{L0}}$	$QSS3 = \frac{\frac{F2 - F1}{YBL}}{\frac{L2 - L1}{L0}}$
$DS1 = \frac{\frac{F3 - F2}{YBL}}{\frac{L2 - L1}{L0}}$	$DS2 = \frac{\frac{F4 - F3}{YBL}}{\frac{L2 - L1}{L0}}$	$DS3 = \frac{\frac{F5 - F4}{YBL}}{\frac{L2 - L1}{L0}}$

Referências para o cálculo de rigidez:

$$YBL = 1112,24 \text{ N}$$

$$F4 = 0,5 * YBL = 556,12 \text{ N}$$

$$F1 = 0,1 * YBL = 111,22 \text{ N}$$

$$F5 = 0,6 * YBL = 667,34 \text{ N}$$

$$F2 = 0,3 * YBL = 333,67 \text{ N}$$

$$L0 = 250 \text{ mm}$$

$$F3 = 0,4 * YBL = 444,90 \text{ N}$$

Resultados obtidos:

30% HMPE E 70% PET									
		INSTRON [mm]	Rig. INSTRON	TOTAL [mm]	Rig. TOTAL	PET [mm]	Rig. PET	HMPE [mm]	Rig. HMPE
QSS1	L1	251,638	3,683	252,197	3,668	163,031	4,256	61,166	26,582
	L2	265,214		265,827		174,780		63,047	
QSS2	L1	261,301	12,180	261,869	12,655	171,541	15,418	62,328	70,622
	L2	265,406		265,820		174,784		63,036	
QSS3	L1	261,704	13,093	262,524	13,366	172,147	17,637	62,377	55,188
	L2	265,523		266,265		174,982		63,283	
DS1	L1	261,916	4,655	262,744	4,726	172,347	5,598	62,397	30,341
	L2	267,287		268,034		176,813		63,221	
DS2	L1	267,287	7,735	268,034	7,601	176,813	10,233	63,221	29,550
	L2	270,519		271,323		179,256		64,067	
DS3	L1	270,519	8,132	271,323	7,580	179,256	9,498	64,067	37,536
	L2	273,593		274,621		181,888		64,733	

40% HMPE E 60% PET									
		INSTRON [mm]	Rig. INSTRON	TOTAL [mm]	Rig. TOTAL	PET [mm]	Rig. PET	HMPE [mm]	Rig. HMPE
QSS1	L1	251,590	4,192	251,740	3,971	137,353	4,847	86,387	21,978
	L2	263,519		264,330		147,668		88,662	
QSS2	L1	260,009	13,477	260,633	11,479	144,353	13,499	88,280	76,688
	L2	263,719		264,989		148,057		88,932	
QSS3	L1	260,381	14,468	261,296	12,807	144,747	14,278	88,549	124,379
	L2	263,837		265,200		148,249		88,951	
DS1	L1	260,588	4,969	261,506	4,802	144,938	6,117	88,568	22,343
	L2	265,619		266,712		149,025		89,687	
DS2	L1	265,619	8,887	266,712	8,234	149,025	10,725	89,687	35,460
	L2	268,432		269,748		151,356		90,392	
DS3	L1	268,432	8,591	269,748	7,683	151,356	10,674	90,392	27,411
	L2	271,342		273,002		153,698		91,304	

50% HMPE E 50% PET									
		INSTRON [mm]	Rig. INSTRON	TOTAL [mm]	Rig. TOTAL	PET [mm]	Rig. PET	HMPE [mm]	Rig. HMPE
QSS1	L1	251,469	4,814	251,077	4,639	112,149	6,064	110,928	19,747
	L2	261,855		261,855		120,395		113,460	
QSS2	L1	258,742	15,011	258,621	14,493	118,096	20,064	112,525	52,193
	L2	262,073		262,071		120,588		113,483	
QSS3	L1	259,095	16,057	259,052	15,451	118,284	21,692	112,768	53,706
	L2	262,209		262,288		120,589		113,699	
DS1	L1	259,296	5,607	259,265	5,268	118,479	7,245	112,786	19,306
	L2	263,755		264,011		121,930		114,081	
DS2	L1	263,755	9,120	264,011	9,645	121,930	14,517	114,081	28,735
	L2	266,496		266,603		123,652		114,951	
DS3	L1	266,496	9,249	266,603	8,916	123,652	14,484	114,951	23,190
	L2	269,199		269,407		125,378		116,029	

70% HMPE E 30% PET									
		INSTRON [mm]	Rig. INSTRON	TOTAL [mm]	Rig. TOTAL	PET [mm]	Rig. PET	HMPE [mm]	Rig. HMPE
QSS1	L1	251,085	7,167	250,860	6,833	61,704	11,534	161,156	16,767
	L2	258,061		258,177		66,039		164,138	
QSS2	L1	255,776	19,897	255,811	17,864	64,658	28,952	163,153	46,642
	L2	258,289		258,610		66,385		164,225	
QSS3	L1	256,071	21,196	256,243	21,124	64,657	32,011	163,586	62,112
	L2	258,430		258,610		66,219		164,391	
DS1	L1	256,248	7,417	256,245	6,844	65,012	13,179	163,233	14,238
	L2	259,619		259,898		66,909		164,989	
DS2	L1	259,619	12,677	259,898	10,557	66,909	23,877	164,989	18,924
	L2	261,591		262,266		67,956		166,310	
DS3	L1	261,591	10,941	262,266	10,562	67,956	23,968	166,310	18,881
	L2	263,876		264,633		68,999		167,634	

70% HMPE E 30% PET									
		INSTRON [mm]	Rig. INSTRON	TOTAL [mm]	Rig. TOTAL	PET [mm]	Rig. PET	HMPE [mm]	Rig. HMPE
QSS1	L1	251,085	7,167	250,860	6,833	61,704	11,534	161,156	16,767
	L2	258,061		258,177		66,039		164,138	
QSS2	L1	255,776	19,897	255,811	17,864	64,658	28,952	163,153	46,642
	L2	258,289		258,610		66,385		164,225	
QSS3	L1	256,071	21,196	256,243	21,124	64,657	32,011	163,586	62,112
	L2	258,430		258,610		66,219		164,391	
DS1	L1	256,248	7,417	256,245	6,844	65,012	13,179	163,233	14,238
	L2	259,619		259,898		66,909		164,989	
DS2	L1	259,619	12,677	259,898	10,557	66,909	23,877	164,989	18,924
	L2	261,591		262,266		67,956		166,310	
DS3	L1	261,591	10,941	262,266	10,562	67,956	23,968	166,310	18,881
	L2	263,876		264,633		68,999		167,634	

Erro relativo da rigidez:

		Rigidez Experimental	Rigidez YOLO	Diferença	Erro relativo [%]
30% HMPE e 70% PET	QSS1	3,683	3,668	0,015	0,396
	QSS2	12,180	12,655	-0,475	3,898
	QSS3	13,093	13,366	-0,273	2,085
	DS1	4,655	4,726	-0,071	1,531
	DS2	7,735	7,601	0,134	1,733
	DS3	8,132	7,580	0,552	6,792
40% HMPE e 60% PET	QSS1	4,192	3,971	0,220	5,250
	QSS2	13,477	11,479	1,999	14,830
	QSS3	14,468	12,807	1,660	11,475
	DS1	4,969	4,802	0,167	3,362
	DS2	8,887	8,234	0,653	7,345
	DS3	8,591	7,683	0,908	10,572
50% HMPE e 50% PET	QSS1	4,814	4,639	0,175	3,637
	QSS2	15,011	14,493	0,518	3,449
	QSS3	16,057	15,451	0,605	3,770
	DS1	5,607	5,268	0,339	6,047
	DS2	9,120	9,645	-0,524	5,748
	DS3	9,249	8,916	0,333	3,602
60% HMPE e 40% PET	QSS1	5,714	5,407	0,306	5,364
	QSS2	17,065	15,088	1,977	11,587
	QSS3	18,189	17,422	0,767	4,216
	DS1	6,499	5,983	0,516	7,944
	DS2	10,250	11,296	-1,047	10,212
	DS3	9,608	8,756	0,851	8,862
70% HMPE e 30% PET	QSS1	7,167	6,833	0,334	4,660
	QSS2	19,897	17,864	2,033	10,218
	QSS3	21,196	21,124	0,072	0,338
	DS1	7,417	6,844	0,573	7,720
	DS2	12,677	10,557	2,120	16,723
	DS3	10,941	10,562	0,379	3,464
		Média		0,527	6,228
		Desvio Padrão		0,775	4,111