



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA**  
**DOUTORADO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA**

**WALESKA FEITOZA DE OLIVEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE SENSORIAMENTO POR FIBRA ÓPTICA  
PARA DETECÇÃO E MEDIÇÃO DE PESO DE VEÍCULOS FERROVIÁRIOS E  
RODOVIÁRIOS**

**FORTALEZA**

**2026**

WALESKA FEITOZA DE OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE SENSORIAMENTO POR FIBRA ÓPTICA PARA  
DETECÇÃO E MEDIÇÃO DE PESO DE VEÍCULOS FERROVIÁRIOS E RODOVIÁRIOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Engenharia de Teleinformática. Área de Concentração: Engenharias IV

Orientador: Prof. Dr. Antonio Sergio Bezerra Sombra

Coorientador: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães

FORTALEZA

2026

**WALESKA FEITOZA DE OLIVEIRA**

**Desenvolvimento de Modelos de Sensoriamento por Fibra  
Óptica para Detecção e Medição de Peso de Veículos  
Ferroviários e Rodoviários**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Teleinformática.

Aprovada em: 30 de março de 2026.

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Antonio Sergio Bezerra Sombra**

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Orientador

---

**Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Coorientador

---

**Prof. Dr. Carlos Alexandre Rolim Fernandes**

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Examinador Interno

---

**Prof. Dr. Joacir Soares de Andrade**

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Examinador Interno

---

**Prof. Dr. Kleber Zuza Nóbrega**

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Examinador Interno

---

**Prof. Dr. Auzuir Ripardo de Alexandria**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Examinador Externo à Instituição

---

**Prof. Dr. Ronaldo Santos da Silva**

Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Examinador Externo à Instituição

---

**Prof. Dr. Victor Dmitriev**

Universidade Federal do Pará (UFPA)

Examinador Externo à Instituição

Dedico este trabalho à minha vózinha, que, mesmo não estando mais aqui em presença, permanece viva em meu coração, nas minhas lembranças e em tudo aquilo que me ensinou com seu amor, seu cuidado e sua fé de que um dia eu me tornaria uma doutora.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador, Prof. Dr. Sérgio Sombra, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Glendo de Freitas, pela orientação, pela confiança depositada neste trabalho, pelo acompanhamento ao longo da pesquisa e por todas as contribuições científicas e acadêmicas que foram fundamentais para o seu desenvolvimento.

Aos membros da banca examinadora, agradeço pela disponibilidade em participar deste momento tão importante, bem como pelas valiosas observações, sugestões e contribuições para o aprimoramento deste trabalho.

Ao meu esposo, Carlos, expresso minha profunda gratidão pelo apoio, pela compreensão, pela paciência e pelo incentivo constante ao longo de toda esta caminhada, especialmente na fase final do doutorado, quando sua presença e seu amparo foram ainda mais essenciais.

Agradeço à Luana, pela presença constante ao longo desta trajetória, pela generosidade em compartilhar conhecimentos, pela disponibilidade em ajudar nos momentos mais desafiadores e por sua valiosa contribuição durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também Prof. Isaac, Alan, Darlan e Aedo, pelas contribuições ao longo deste processo, pela troca de conhecimentos, pelo apoio e pela colaboração em diferentes etapas desta trajetória.

Ao Laboratório de Fotônica e ao LOCEM, deixo meu agradecimento pelo suporte oferecido durante a realização da pesquisa, pela estrutura disponibilizada e pelo ambiente de aprendizado e colaboração que tanto contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

À FUNCAP, ao CNPq, ao Polo de Inovação EMBRAPPII, à Atlanta e à Infitech, agradeço pelo apoio financeiro, que foi indispensável para a viabilização e execução deste projeto.

Agradeço, de modo especial, ao Prof. Perboyre e à equipe do LMCC, especialmente o Leandro, pela disponibilidade, receptividade e apoio, bem como por disponibilizarem o laboratório para a realização dos testes laboratoriais necessários a esta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos os demais membros, colegas e colaboradores que, mesmo não citados nominalmente, contribuíram de forma direta ou indireta para a concretização deste trabalho.

## RESUMO

Esta tese apresenta o desenvolvimento, a implementação e a validação experimental de dois sistemas de sensoriamento óptico baseados em fibra para aplicações em monitoramento de transporte. O primeiro sistema consiste em um sensor de vibração na configuração *single-mode-multimode-single-mode* (SMS), proposto para a detecção da passagem de veículos ferroviários a partir das vibrações induzidas no trilho. O segundo corresponde a um sistema de pesagem em movimento (Weigh-In-Motion, WIM) baseado em redes de Bragg em fibra óptica (FBG), destinado ao monitoramento de cargas veiculares em tráfego contínuo. Para o sensor SMS, foram realizados ensaios em laboratório e testes de campo supervisionados com veículo leve sobre trilhos, trem de carga e trem de manutenção. Os resultados demonstraram a viabilidade da detecção dos eventos ferroviários por meio da análise da variabilidade do sinal, bem como a existência de assinaturas espectrais associadas aos diferentes tipos de veículos. A energia espectral em baixa frequência, isto é, a quantidade de energia do sinal distribuída nas componentes de frequências mais baixas, apresentou correlação aproximadamente linear com o peso dos veículos, evidenciando o potencial do sistema para aplicações futuras de caracterização e classificação ferroviária. Para o sistema WIM com FBG, foi desenvolvida uma estrutura mecânica instrumentada em alumínio, associada a um sistema óptico-eletrônico de aquisição e a elementos de amortecimento em silicone. A validação experimental incluiu ensaios estáticos em laboratório com máquina universal e testes de campo com veículos reais. Os resultados mostraram comportamento consistente nos testes estáticos, permitindo a calibração do sistema e a avaliação de modelos para estimativa de carga. Nos testes dinâmicos em fluxo livre, embora a estimativa precisa do peso total em movimento ainda demande aperfeiçoamentos, os registros obtidos demonstraram sensibilidade à passagem dos eixos e evidenciaram que os sinais medidos contêm informação física relevante para evolução futura do sistema. Em conjunto, os resultados confirmam o potencial dos sensores ópticos baseados em fibra para aplicações em ambientes de transporte, destacando sua imunidade eletromagnética, versatilidade, sensibilidade e capacidade de integração a sistemas inteligentes de monitoramento.

**Palavras-chave:** Sensores de fibra óptica. Configuração SMS. Grades de Bragg em fibra. Pesagem em movimento. Detecção de trens. Monitoramento de transporte. Vibração ferroviária.

## ABSTRACT

This thesis presents the development, implementation, and experimental validation of two fiber-optic sensing systems for transportation monitoring applications. The first system consists of a vibration sensor based on the single-mode–multimode–single-mode (SMS) configuration, proposed for detecting the passage of railway vehicles through the vibrations induced in the rail. The second system corresponds to a Weigh-In-Motion (WIM) system based on fiber Bragg gratings (FBG), designed for monitoring vehicular loads under continuous traffic conditions.

For the SMS sensor, laboratory experiments and supervised field tests were conducted using a light vehicle running on rails, a freight train, and a maintenance train. The results demonstrated the feasibility of detecting railway events through the analysis of signal variability, as well as the presence of spectral signatures associated with different types of vehicles. The spectral energy at low frequencies, that is, the amount of signal energy distributed over the lower-frequency components, showed an approximately linear correlation with vehicle weight, highlighting the potential of the system for future applications in railway characterization and classification.

For the FBG-based WIM system, an instrumented aluminum mechanical structure was developed and integrated with an opto-electronic acquisition system and silicone damping elements. The experimental validation included static laboratory tests using a universal testing machine and field tests with real vehicles. The results showed consistent behavior in the static tests, enabling system calibration and the evaluation of models for load estimation. In the dynamic free-flow tests, although accurate estimation of the total vehicle weight in motion still requires further improvements, the recorded signals demonstrated sensitivity to axle passages and indicated that the measured signals contain relevant physical information for the future development of the system. Overall, the results confirm the potential of fiber-optic sensors for applications in transportation environments, highlighting their electromagnetic immunity, versatility, sensitivity, and capability for integration into intelligent monitoring systems.

**Keywords:** Fiber optic sensors. SMS configuration. Fiber Bragg grating. Weigh-in-motion. Train detection. Transportation monitoring. Railway vibration.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Interferência multimodal em uma fibra multimodo. A subfigura (a) ilustra a propagação do sinal e a formação de interferência multimodal dentro da fibra, enquanto as subfiguras (b) e (c) mostram os sinais ópticos resultantes sob interferência construtiva e destrutiva, respectivamente. . . . . 30
- Figura 2 – Esquema ilustrativo do princípio de funcionamento de uma Grade de Bragg em Fibra, destacando a modulação periódica do índice de refração no núcleo da fibra e os espectros incidente, refletido e transmitido. . . . . 34
- Figura 3 – Diagrama de blocos do laço óptico utilizado no *setup* experimental, mostrando a interconexão entre a fonte laser, *patch cables*, cabos monomodo, fibra multimodo e o fotodiodo. . . . . 56
- Figura 4 – Protótipo mecânico do sensor de vibração para fixação em trilhos ferroviários: (a) modelagem 3D do suporte mecânico; (b) Sensor impresso e instalado no trilho durante os testes em campo. . . . . 58
- Figura 5 – Sistema eletrônico embarcado acondicionado em caixa patola. (a) Representação tridimensional da caixa fechada contendo o sistema eletrônico; (b) vista explodida em modelo 3D evidenciando a disposição dos componentes internos, incluindo a placa de circuito impresso e os elementos de fixação; (c) fotografia do sistema implementado durante os testes experimentais em campo. 60
- Figura 6 – Representação da configuração experimental básica do sistema. . . . . 61
- Figura 7 – Visão geral do sistema de sensoriamento instalado no trilho: protótipo mecânico com a fibra multimodo fixada ao trilho, cabo *drop* monomodo interligando o sensor e caixa patola contendo o sistema eletrônico embarcado. . . 65
- Figura 8 – Configuração experimental de bancada utilizada para validar a prova de conceito da detecção de vibração usando uma configuração de fibra SMS. . . 71

Figura 9 – Configurações experimentais adotadas nos ensaios de laboratório para investigação da influência do amortecimento e da acomodação mecânica da fibra multimodo sobre a resposta do sensor SMS: (a) aplicação direta de vibração sobre a fibra sensora, sem elementos de amortecimento ou proteção mecânica; (b) configuração com camadas de esponja posicionadas apenas sobre a fibra, utilizada para avaliar o efeito do amortecimento superior na atenuação do sinal; e (c) configuração com camadas de esponja posicionadas acima e abaixo da fibra, proporcionando suporte mecânico simétrico e melhor compromisso entre estabilidade e sensibilidade do sinal detectado. . . . .	72
Figura 10 – Veículo leve sobre trilhos aproximando-se da área de detecção. . . . .	75
Figura 11 – Trem de carga utilizado nos testes de campo controlados, composto por uma locomotiva e dois vagões de carga com diferentes características de massa. . . . .	77
Figura 12 – Trem de manutenção utilizado nos testes de campo controlados. A fibra sensora foi montada diretamente no trilho utilizando um suporte específico, permitindo a aquisição de sinais de vibração gerados por um veículo ferroviário mais leve. . . . .	78
Figura 13 – Protótipo com FBGs para pesagem em movimento: disposição dos pontos de sensoriamento ao longo da estrutura mecânica (alumínio 6061) e identificação das FBGs por canal e respectivos comprimentos de onda centrais (nm) utilizados na interrogação. . . . .	80
Figura 14 – Vista explodida do protótipo mecânico instrumentado com FBG para pesagem em movimento: estrutura em alumínio (6061), pontos de sensoriamento encapsulados em borracha de silicone e percurso da fibra óptica, evidenciando a montagem em camadas e os elementos de fixação. . . . .	81
Figura 15 – Molde para fabricação das borrachas de silicone (shore 55). . . . .	83
Figura 16 – Amostras de borracha de silicone (shore 55) produzidas com diferentes proporções de catalisador: exemplares acondicionados e identificados (3%, 4% e 5%) para os ensaios de compressão e avaliação de durabilidade. . . . .	83

Figura 17 – Registro dos ensaios estáticos em laboratório na máquina universal de ensaios EMIC: (a) detalhe do conjunto de compressão com a célula de carga e o prato de compressão atuando sobre o corpo de prova (estrutura de pesagem); (b) visão geral do posicionamento do corpo de prova na máquina durante a aplicação de carga. . . . .	85
Figura 18 – Interface do <i>software BraggSens</i> 1.89 com espectro de reflexão das grades de Bragg, destacando os picos espectrais associados aos canais monitorados. . .	86
Figura 19 – Interface do <i>software BraggSens</i> 1.89 durante a aplicação de carga nos ensaios estáticos em laboratório, mostrando a variação temporal da deformação registrada pelos sensores de rede de Bragg. . . . .	86
Figura 20 – Veículos utilizados nos testes estáticos supervisionados em campo: (a) <i>Volkswagen Worker</i> 8.120 adaptado com plataforma de reboque (3500 kg); (b) <i>Volkswagen Worker</i> 6.160 (4090 kg); (c) <i>Iveco Daily</i> com baú, da linha <i>Daily Chassi-Cabine/Furgão</i> de carga (4890 kg). . . . .	87
Figura 21 – Implantação do protótipo de pesagem em campo: (a) etapa de instalação, com a estrutura posicionada no corte longitudinal executado no pavimento; (b) protótipo após a instalação. . . . .	88
Figura 22 – Veículos leves registrados nos ensaios dinâmicos do sistema de pesagem baseado em FBG: (a) <i>Volkswagen Up</i> ; (b) <i>Toyota Yaris Sedan</i> . . . . .	90
Figura 23 – Resposta elétrica do fotodiodo obtida durante os ensaios de vibração da fibra multimodo em diferentes condições de acomodação mecânica: (a) aplicação direta de vibração sobre a fibra sensora, sem elementos de amortecimento, produzindo elevada variação de amplitude e maior instabilidade temporal do sinal; (b) aplicação de vibração com camadas de esponja posicionadas apenas sobre a fibra, resultando em maior amortecimento mecânico, redução da amplitude do sinal e menor sensibilidade; e (c) aplicação de vibração com camadas de esponja posicionadas acima e abaixo da fibra, proporcionando suporte mecânico simétrico, resposta mais estável e melhor equilíbrio entre sensibilidade e estabilidade do sinal detectado. . . . .	96

Figura 24 – Resposta do sinal elétrico durante a primeira passagem de um VLT expressa como uma função do número de amostras: a) tensão elétrica medida adquirida pelo sistema de aquisição de dados de bordo. b) Primeira derivada do sinal, destacando as rápidas variações de amostra para amostra associadas às vibrações dos trilhos induzidas pela passagem do veículo. . . . .	98
Figura 25 – Resposta do sinal elétrico durante a segunda passagem de um VLT, expressa em função do número de amostras: a) tensão elétrica medida adquirida pelo sistema de aquisição de dados de bordo. b) Primeira derivada do sinal, destacando as variações de amostra para amostra induzidas pelas vibrações dos trilhos durante a passagem do veículo. . . . .	99
Figura 26 – Resposta do sinal elétrico durante a terceira passagem de um VLT, expressa em função do número de amostras: a) tensão elétrica medida adquirida pelo sistema de aquisição de dados de bordo. b) Primeira derivada do sinal, destacando as variações de amostra para amostra induzidas pelas vibrações dos trilhos durante a passagem do veículo. . . . .	100
Figura 27 – Sinais de vibração adquiridos durante a passagem do trem de carga operando a 5 km/h: (a) saída bruta do sensor e (b) primeira derivada do sinal. . . . .	102
Figura 28 – Sinais de vibração adquiridos durante a passagem do trem de carga operando a 15 km/h: (a) saída bruta do sensor e (b) primeira derivada do sinal. . . . .	103
Figura 29 – Sinais de vibração adquiridos durante a passagem do trem de manutenção: (a) saída bruta do sensor e (b) primeira derivada do sinal. . . . .	104
Figura 30 – Espectros de amplitude em função da frequência obtidos durante diferentes passagens do evento monitorado: (a) primeira passagem, (b) segunda passagem e (c) terceira passagem. . . . .	106
Figura 31 – Espectros de amplitude em função da frequência obtidos durante a passagem do trem de carga operando em diferentes velocidades: (a) 5 km/h e (b) 15 km/h. Os espectros destacam mudanças na distribuição de energia espectral associadas a efeitos dinâmicos dependentes da velocidade, enquanto a massa do trem permanece constante. . . . .	107
Figura 32 – Espectro de amplitude em função da frequência obtido durante a passagem do trem de manutenção. . . . .	108

Figura 33 – Energia espectral (0-12 Hz) versus peso do veículo, com ajuste de regressão linear (inclinação = 0,0017 u.a./t; $R^2 = 0,933$ ). . . . .	109
Figura 34 – Curvas de força em função da deformação obtidas nos ensaios de compressão das amostras de borracha de silicone com diferentes concentrações de catalisador: (a) 3%, (b) 4% e (c) 5%. . . . .	111
Figura 35 – Curva de calibração do sensor FBG obtida a partir da deformação média medida em função da carga aplicada, com barras de erro associadas à repetibilidade experimental e ajuste polinomial de segunda ordem. . . . .	116
Figura 36 – Comparação entre os valores de carga predita pelo modelo <i>Ridge Poly2</i> e os valores ideais de referência em função da carga real aplicada. . . . .	125
Figura 37 – Erro percentual da calibração por nível de carga para o modelo <i>Ridge Poly2</i> . . . . .	127
Figura 38 – Relação entre a deformação média por caminhão e o peso de referência dos veículos, com ajuste linear dos dados experimentais. . . . .	131
Figura 39 – Relação entre a deformação média por caminhão e o peso de referência dos veículos, com ajuste linear dos dados experimentais. . . . .	139
Figura 40 – Registro dinâmico da passagem do veículo Ford Ecosport FSL 1.6 em teste de campo em fluxo livre: (a) imagem do veículo durante a travessia sobre a região instrumentada; (b) resposta temporal de deformação ( <i>strain</i> ) medida pelo sistema <i>BraggSens</i> , evidenciando os picos associados à passagem dos eixos. . . . .	147
Figura 41 – Registro dinâmico da passagem do veículo Fiat Siena Attract 1.0 em teste de campo em fluxo livre: (a) imagem do veículo durante a travessia sobre a região instrumentada; (b) resposta temporal de deformação ( <i>strain</i> ) medida pelo sistema <i>BraggSens</i> , mostrando os picos correspondentes à passagem dos dois eixos. . . . .	148
Figura 42 – Registro dinâmico da passagem do veículo Jeep Compass Longitude D em teste de campo em fluxo livre: (a) imagem do veículo durante a travessia sobre a região instrumentada; (b) resposta temporal de deformação ( <i>strain</i> ) medida pelo sistema <i>BraggSens</i> , destacando os eventos associados à passagem sequencial dos eixos do veículo. . . . .	149
Figura 43 – Tabela: Contribuição detalhada de cada termo w·z (kgf) . . . . .	161
Figura 44 – Tabela: Contribuições agrupadas por tipo de feature (kgf) . . . . .	161

Figura 45 – Tabela: Termos que mais variam com a carga (os que efetivamente calibram)	162
Figura 46 – Nomenclatura utilizada . . . . .	162
Figura 47 – Composição da Predição por Nível de Carga. . . . .	162

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos correlatos com sensores SMS e tecnologias relacionadas. . . . .	43
Tabela 2 – Trabalhos correlatos com sensores FBG. . . . .	50
Tabela 3 – Componentes utilizados no sistema. . . . .	62
Tabela 4 – Módulo de elasticidade das amostras de borracha de silicone para diferentes concentrações de catalisador. . . . .	112
Tabela 5 – Comparação das propriedades mecânicas das amostras de borracha analisadas.	113
Tabela 6 – Resultados dos ensaios estáticos para diferentes níveis de carga aplicada, considerando quatro ensaios experimentais, média e desvio padrão. . . . .	115
Tabela 7 – Resultados da validação da equação de calibração para diferentes níveis de carga aplicada. . . . .	118
Tabela 8 – Top 10 modelos avaliados para estimativa de peso utilizando validação cruzada LORO. . . . .	120
Tabela 9 – Validação externa utilizando cargas não empregadas no ajuste principal. . .	121
Tabela 10 – Pontuação metrológica composta utilizada para comparação entre os modelos candidatos. . . . .	121
Tabela 11 – Métricas do modelo <i>Multi Poly2 + Ridge</i> utilizando quatro FBGs. . . . .	122
Tabela 12 – Dados experimentais e resultados de predição do modelo. . . . .	123
Tabela 13 – Médias por nível de carga utilizadas na curva de calibração do modelo Ridge Poly2. . . . .	124
Tabela 14 – Validação externa com 3 pontos independentes. . . . .	126
Tabela 15 – Média total de deformação por veículo, peso de referência, valor estimado pela lei de formação e erro percentual absoluto. . . . .	129
Tabela 16 – Aplicação da lei de formação aplicada individualmente para cada teste de repetibilidade referente ao veículo <i>Iveco Daily com baú</i> . . . . .	133
Tabela 17 – Aplicação da lei de formação aplicada individualmente para cada teste de repetibilidade referente ao veículo <i>Volkswagen Worker 8.120</i> . . . . .	133
Tabela 18 – Aplicação da lei de formação aplicada individualmente para cada teste de repetibilidade referente ao veículo <i>Volkswagen Worker 6.160</i> . . . . .	134
Tabela 19 – Análise da soma dos lados do veículo <i>Iveco Daily com baú</i> para tempo de integração de 15 ms. . . . .	135

Tabela 20 – Análise da soma dos lados do veículo <i>Iveco Daily com baú</i> para tempo de integração de 100 ms. . . . .	135
Tabela 21 – Análise da soma dos lados do veículo <i>Volkswagen Worker 8.120</i> . . . . .	136
Tabela 22 – Análise da soma dos lados do veículo <i>Volkswagen Worker 6.160</i> . . . . .	137
Tabela 23 – Análise da média da soma dos lados do veículo para os três veículos avaliados.	138
Tabela 24 – Comparação entre as condições experimentais de laboratório e de campo. . .	140
Tabela 25 – Desempenho do modelo original e do modelo retreinado com sensores comuns ao laboratório e ao campo. . . . .	141
Tabela 26 – Exemplo de deslocamento de <i>baseline</i> entre os sinais de laboratório e de campo.	141
Tabela 27 – Correlação entre os deltas dos sensores e o peso nos cenários de laboratório e de campo. . . . .	142
Tabela 28 – Comparação das correlações antes e após a filtragem por qualidade de sinal (SNR). . . . .	143
Tabela 29 – Melhores correlações entre atributos extraídos dos sinais e o peso dos veículos em campo. . . . .	143
Tabela 30 – Resultados obtidos com modelos baseados em amostras temporais e janelas deslizantes. . . . .	144
Tabela 31 – Resumo das abordagens testadas na Fase 2 com modelos treinados diretamente com dados de campo. . . . .	144
Tabela 32 – Top 10 resultados obtidos na comparação entre diferentes tipos de modelos e conjuntos de atributos. . . . .	145
Tabela 33 – Comparação entre desempenho em treinamento e validação Leave-One-Out para análise de overfitting. . . . .	145
Tabela 34 – Informações do veículo Ford/Ecosport FSL 1.6. . . . .	148
Tabela 35 – Informações do veículo FIAT/SIENA ATTRACT 1.0. . . . .	149
Tabela 36 – Informações do veículo Jeep Compass Longitude D. . . . .	150

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	Conversão Analógico-Digital
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ASE	Amplified Spontaneous Emission
CAD	Computer-Aided Design
CEASA-CE	Centrais de Abastecimento do Ceará
DFB	Distributed Feedback
DFT	Transformada Discreta de Fourier
EMI	Interferência Eletromagnética
FBG	Fiber Bragg Grating
FC	Ferrule Connector
FODS	Fiber Optic Detection System
FFT	Transformada Rápida de Fourier
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
InGaAs	Índio-Gálio-Arsênio
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LED	Light Emitting Diode
LMCC	Laboratório de Mecânica Computacional e Comportamento dos Materiais
LOCEM	Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais
LORO	Leave-One-Run-Out
MCU	Microcontroller Unit
MMF	Multimode Fiber

MZI	Mach-Zehnder Interferometer
PDMS	Polidimetilsiloxano
PCI	Placa de Circuito Impresso
PLA	Polylactic Acid
SC	Subscriber Connector
SFO	Sensor de Fibra Óptica
SMF	Single-Mode Fiber
SMS	Single-Mode–Multimode–Single-Mode
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SR830	Amplificador Lock-in modelo SR830
TESC	Software de controle da máquina universal EMIC
UFC	Universidade Federal do Ceará
USB	Universal Serial Bus
VAD	Voice Activity Detection
VLT	Veículo Leve sobre Trilhos
WIM	Weigh-In-Motion

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\lambda$	Comprimento de onda
$I$	Corrente elétrica
$E(r, z)$	Campo elétrico total
$A_m(r)$	Deslocamento quadrupolar
$I(z)$	Intensidade óptica total
$\beta_m$	Constante de propagação
$\Delta\phi_{mn}$	Diferença de fase relativa entre quaisquer dois modos m e n
$L$	Comprimento da MMF
$n_{\text{eff},m}(t)$	Índice de refração efetivo de cada modo
$\pi$	Número Pi
$R$	Responsividade do fotodiodo.
$V_{\text{out}}(t)$	Tensão elétrica na saída
$\beta$	Comprimento de onda de Bragg
$\varepsilon$	Deformação mecânica
$T$	Temperatura
$n_{\text{eff}}$	Índice efetivo do modo guiado
$\Lambda$	Período da grade
$p_e$	Coefficiente fotoelástico efetivo
$F$	Força
$P$	Peso
$k$	Constante de conversão força–deformação
$x[n]$	Sinal de vibração em tempo discreto
$N$	Número amostras
$\sigma^2$	Variância
$\mu$	Média dos valores
$\sigma_{\text{base}}^2(k)$	Nível de ruído de fundo

$\alpha$	Parâmetro de suavização que controla a velocidade de adaptação
$z_i$	Valor padronizado utilizado na regressão
$x_i$	Valor bruto da variável de entrada
$\mu_i$	Média calculada para variável $i$
$s_i$	Fator de escala associado
$\hat{y}$	Carga estimada
$\beta_0$	Termo independente do modelo
$\beta_j$	Coefficientes ajustados
$z_j$	Variáveis padronizadas
$\sigma$	Tensão mecânica
$F$	Força
$A$	Área da seção transversal
$E$	Módulo de elasticidade ou módulo de Young
$k$	Rigidez

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>25</b>
<b>1.1.1</b>	<i>Objetivo Geral</i>	<b>25</b>
<b>1.1.2</b>	<i>Objetivos Específicos</i>	<b>26</b>
<b>1.2</b>	<b>Organização da tese</b>	<b>27</b>
<b>1.3</b>	<b>Produção científica e tecnológica decorrente da tese</b>	<b>27</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>Interferência Multimodal</b>	<b>29</b>
<b>2.2</b>	<b>Condição de Bragg</b>	<b>33</b>
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	<b>38</b>
<b>3.1</b>	<b>Sensores de fibra SMS</b>	<b>38</b>
<b>3.2</b>	<b>Sensores de grade de Bragg em fibra</b>	<b>44</b>
<b>3.3</b>	<b>Comparação crítica dos trabalhos correlatos e posicionamento da tese</b>	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>54</b>
<b>4.1</b>	<b>Construção do sensor SMS para detecção de trens por vibração</b>	<b>54</b>
<b>4.1.1</b>	<i>Construção do elemento sensor em configuração SMS</i>	<b>54</b>
<b>4.1.2</b>	<i>Construção mecânica sensor</i>	<b>56</b>
<b>4.1.3</b>	<i>Eletrônica embarcada</i>	<b>58</b>
<b>4.1.4</b>	<i>Setup experimental</i>	<b>60</b>
<b>4.1.5</b>	<i>Montagem do sistema integrado e interface óptico-eletrônica</i>	<b>64</b>
<b>4.1.6</b>	<i>Sistema de aquisição e análise dos dados</i>	<b>65</b>
<b>4.1.7</b>	<i>Algoritmo de detecção adaptativa baseado em sinais para eventos de passagem de trens</i>	<b>66</b>
<b>4.1.7.1</b>	<i>Variância como medida relacionada à energia</i>	<b>66</b>
<b>4.1.7.2</b>	<i>Estimativa Adaptativa do Ruído de Fundo</i>	<b>66</b>
<b>4.1.7.3</b>	<i>Lógica de Detecção de Eventos</i>	<b>67</b>
<b>4.1.7.4</b>	<i>Interpretação Prática e Vantagens do Método</i>	<b>67</b>
<b>4.1.8</b>	<b>Testes em laboratório: prova de conceito</b>	<b>68</b>
<b>4.1.8.1</b>	<i>Ensaio com aplicação direta de vibração sobre a fibra multimodo sensora</i>	<b>71</b>
<b>4.1.8.2</b>	<i>Ensaio com camadas de esponja posicionadas sobre a fibra sensora</i>	<b>71</b>

4.1.8.3	<i>Ensaio com camadas de esponja posicionadas acima e abaixo da fibra sensora</i>	72
<b>4.1.9</b>	<b><i>Testes de campo supervisionados</i></b>	72
4.1.9.1	<i>Testes de campo com VLT em linha de operação</i>	75
4.1.9.2	<i>Testes de campo com trem de carga</i>	76
4.1.9.3	<i>Testes de campo com trem de manutenção</i>	78
<b>4.2</b>	<b><i>Construção do sensor de peso em movimento baseado em grades de Bragg em fibra</i></b>	79
4.2.1	<i>Setup experimental</i>	80
4.2.2	<i>Testes com borrachas de silicone para amortecimento</i>	82
4.2.3	<i>Testes estáticos em laboratório com máquina universal</i>	84
4.2.4	<i>Testes de campo estáticos e supervisionados</i>	86
4.2.5	<i>Testes dinâmicos de fluxo livre</i>	89
4.2.6	<i>Modelagem e análise dos dados do sistema de pesagem com FBG</i>	90
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	94
<b>5.1</b>	<b>Sensor de fibra óptica SMS para detecção de trens: resultados e discussões</b>	94
5.1.1	<i>Testes em laboratório: prova de conceito</i>	94
5.1.1.1	<i>Ensaio com aplicação direta de vibração sobre a fibra multimodo sensora</i>	94
5.1.1.2	<i>Ensaio com camadas de esponja posicionadas sobre a fibra sensora</i>	95
5.1.1.3	<i>Ensaio com camadas de esponja posicionadas acima e abaixo da fibra sensora</i>	95
5.1.2	<i>Teste de campo com VLT</i>	97
5.1.3	<i>Teste de campo com trem de carga</i>	101
5.1.4	<i>Teste de campo com trem de manutenção</i>	103
5.1.5	<i>Análise no domínio da frequência</i>	105
5.1.6	<i>Sensitividade do Sensor</i>	108
<b>5.2</b>	<b>Sensor de peso em movimento usando FBG: resultados e discussões</b>	111
5.2.1	<i>Análise Mecânica das Borrachas de Silicone com Diferentes Concentrações de Catalisador</i>	111
5.2.2	<i>Testes estáticos em laboratório com máquina universal de ensaio</i>	114
5.2.2.1	<i>Modelagem e análise dos dados do sistema de pesagem com FBG</i>	119
5.2.2.2	<i>Curva de calibração e desempenho do modelo Ridge Poly2</i>	122
5.2.3	<i>Testes de campo estáticos e supervisionados</i>	128
5.2.4	<i>Testes dinâmicos de fluxo livre</i>	140

5.2.4.1	<i>Análise dos resultados dos testes dinâmicos em campo em fluxo livre . . . .</i>	140
5.2.4.2	<i>Análise complementar dos registros dinâmicos em fluxo livre . . . . .</i>	146
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	151
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	154
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	155
	<b>APÊNDICES . . . . .</b>	161
	<b>APÊNDICE A – Figuras e Tabelas complementares . . . . .</b>	161

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias digitais e a consolidação dos conceitos associados à Indústria 4.0 têm promovido profundas transformações nos sistemas produtivos e de infraestrutura, impulsionando a adoção de soluções baseadas em automação, conectividade, monitoramento em tempo real e análise de dados ... análise de dados (Damilos *et al.*, 2024; Lee *et al.*, 2015). Nesse cenário. Nesse cenário, os sistemas de transporte assumem papel estratégico, especialmente nos setores ferroviário e rodoviário de cargas, nos quais a segurança operacional, a eficiência logística e a confiabilidade dos sistemas de monitoramento são requisitos fundamentais para o desenvolvimento econômico e social (Alahi *et al.*, 2023).

No contexto ferroviário, a detecção confiável da presença de trens em passagens de nível e trechos críticos da via férrea é essencial para o controle do tráfego e a segurança de passageiros e pedestres (Singh *et al.*, 2022). As tecnologias tradicionalmente empregadas para esse fim, como circuitos de via, laços indutivos e sensores eletromecânicos, apresentam limitações relevantes, incluindo sensibilidade à interferência eletromagnética, degradação sob condições ambientais adversas, custos elevados de instalação e manutenção, além de restrições quanto à integração com sistemas modernos de supervisão e controle, logo, tais limitações têm motivado a busca por soluções alternativas mais robustas, confiáveis e compatíveis com as exigências atuais de digitalização e automação dos sistemas de transporte (Du *et al.*, 2025).

Nesse contexto, os sensores de fibra óptica (SFO) têm se destacado como uma tecnologia promissora para aplicações em monitoramento ferroviário, devido a características como alta resistência à interferência eletromagnética, elevada sensibilidade, estabilidade a longo prazo e capacidade de operação em ambientes severos (Chan *et al.*, 2021). Ademais, diversas abordagens baseadas em fibras ópticas têm sido investigadas para a detecção de vibrações induzidas pela passagem de trens, empregando interferômetros ópticos, sistemas distribuídos de sensoriamento acústico e grades de Bragg em fibra, permitindo a extração de informações relacionadas à presença, velocidade e características dinâmicas das composições ferroviárias (Kowarik *et al.*, 2020; Nedoma *et al.*, 2018; Esbeen *et al.*, 2022).

Entre essas abordagens, os sensores baseados na configuração SMS, do inglês, *Single – mode – Multimode – Single – mode*, que significa Monomodo–Multimodo–Monomodo, exploram fenômenos de interferência multimodal e autoimagem no trecho de fibra multimodo, apresentando elevada sensibilidade a perturbações mecânicas externas. Essa configuração destaca-se pela simplicidade construtiva, baixo custo e facilidade de implementação, tornando-se

uma alternativa atrativa para aplicações de detecção de vibração em infraestrutura ferroviária (Morshed *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2021; Ran *et al.*, 2015).

No âmbito desta tese, é desenvolvido um sistema de detecção de trens baseado em laços de fibra óptica na configuração SMS, destinado à identificação de vibrações mecânicas induzidas pela passagem de veículos ferroviários. O sistema foi inicialmente caracterizado em ambiente laboratorial controlado e, posteriormente, submetido a testes em campo supervisionados, realizados com o apoio das autoridades locais responsáveis pela operação do sistema de veículos leves sobre trilhos (VLT). Os ensaios em campo contemplaram diferentes condições operacionais e três tipos distintos de veículos ferroviários: um VLT em operação regular, um trem de carga e um trem de manutenção, assegurando que o escopo experimental abrangesse situações representativas da operação ferroviária real.

De forma complementar, o transporte rodoviário de cargas enfrenta desafios significativos relacionados ao controle de peso dos veículos em circulação, uma vez que o excesso de carga compromete a segurança viária, acelera a degradação do pavimento e gera impactos econômicos relevantes (Jacob e Feypell-de La Beaumelle, 2010). Sistemas de pesagem em movimento (*Weigh-In-Motion* – WIM) surgem como uma solução estratégica para o monitoramento contínuo e não intrusivo de cargas veiculares, superando limitações associadas a balanças estáticas e postos fixos de fiscalização (Rocheti e Bacurau, 2024).

Entre as tecnologias empregadas em sistemas WIM, sensores baseados em grades de Bragg em fibra óptica (*Fiber Bragg Gratings* – FBGs) destacam-se pela elevada resolução, estabilidade, imunidade eletromagnética e possibilidade de multiplexação (Liu *et al.*, 2025). As FBGs operam com base na variação do comprimento de onda de Bragg refletido, associada a deformações mecânicas induzidas por cargas aplicadas à estrutura instrumentada, permitindo a inferência indireta do peso dos veículos em movimento (Hill e Meltz, 1997).

No escopo desta tese, é desenvolvido um sensor de peso em movimento baseado em uma cadeia de sensores FBG integrada a uma estrutura mecânica instrumentada e a um sistema óptico-eletrônico de aquisição de dados. A validação experimental do sistema foi conduzida em duas etapas. Inicialmente, foram realizados ensaios estáticos em laboratório, utilizando pesos previamente selecionados e aplicados de forma controlada por meio de uma máquina universal de ensaios. Em seguida, o sensor foi instalado em um trecho pavimentado de tráfego contínuo localizado no interior da universidade, onde foram realizados testes em campo com a passagem de veículos reais. Durante esses ensaios, os dados ópticos foram registrados pelo sistema de

aquisição, enquanto registros visuais complementares foram obtidos por meio de um tablet dedicado à captura de imagens e vídeos, permitindo a adequada documentação das condições experimentais.

No que se refere aos diferenciais desta tese em relação à literatura, destaca-se, no caso do sensor SMS, não apenas a adoção da configuração em si, mas sobretudo sua aplicação específica à detecção ferroviária, ainda pouco explorada em trabalhos reportados na literatura. Além disso, o presente estudo contempla medições realizadas com VLT em linha operacional real, isto é, em ambiente não controlado e sujeito às variabilidades próprias da operação ferroviária, o que confere maior relevância prática aos resultados obtidos. Soma-se a isso a análise comparativa entre três tipos distintos de veículos ferroviários VLT, trem de carga e trem de manutenção, abordagem ainda escassa na literatura e importante para ampliar a compreensão das assinaturas vibracionais associadas a diferentes condições de operação. No caso do sensor FBG aplicado à pesagem em movimento, embora existam diversos trabalhos dedicados ao tema, a literatura ainda se mostra limitada no que diz respeito a testes de campo em ambiente real, sem controlabilidade experimental, especialmente quando associados ao uso de técnicas de *machine learning* para calibração e análise dos dados do sistema WIM, aspecto que constitui outro diferencial relevante desta pesquisa em relação às abordagens mais convencionais.

Dessa forma, esta tese apresenta como principais contribuições o desenvolvimento, a implementação e a validação experimental, em laboratório e em campo, de dois sistemas distintos e complementares baseados em sensores de fibra óptica: um sensor de vibração em configuração SMS para detecção de trens em ambientes ferroviários e um sensor de peso em movimento baseado em FBGs para monitoramento de cargas veiculares em tráfego contínuo. A abordagem adotada reforça o caráter aplicado da pesquisa e evidencia o potencial dos sensores de fibra óptica como elementos-chave para sistemas inteligentes de monitoramento de transporte, alinhados às demandas contemporâneas de segurança, confiabilidade e integração digital.

## **1.1 Objetivos**

### ***1.1.1 Objetivo Geral***

Desenvolver, implementar e validar experimentalmente sistemas de sensoriamento baseados em fibra óptica aplicados ao monitoramento de transporte, contemplando a detecção de vibrações induzidas por veículos ferroviários e a medição de peso de veículos em movimento,

por meio de ensaios realizados em ambiente laboratorial controlado e em condições reais de campo.

### **1.1.2 *Objetivos Específicos***

- Desenvolver um sensor de vibração baseado em fibra óptica na configuração SMS, explorando fenômenos de interferência multimodal e autoimagem para a detecção da presença de trens em infraestrutura ferroviária, explorando uma aplicação ainda pouco reportada na literatura para esse setor;
- Caracterizar o comportamento do sensor de vibração SMS em ambiente laboratorial, avaliando sua resposta a excitações mecânicas controladas e repetitivas;
- Implementar o sensor de vibração SMS em ambiente ferroviário real e realizar testes de campo supervisionados, contemplando diferentes tipos de veículos, incluindo VLT em operação regular, trem de carga e trem de manutenção;
- Investigar o desempenho do sensor SMS na comparação entre três tipos distintos de veículos ferroviários em condições reais de operação, algo pouco reportado na literatura;
- Desenvolver um sistema de pesagem em movimento baseado em uma cadeia de sensores com FBGs, integrando componentes ópticos, eletrônicos e estruturais;
- Caracterizar experimentalmente o sensor WIM em ambiente laboratorial por meio de ensaios estáticos, utilizando pesos previamente selecionados e aplicados de forma controlada com o auxílio de uma máquina universal de ensaios;
- Implementar o sensor WIM em um trecho pavimentado de tráfego contínuo e realizar testes em campo com a passagem de veículos reais e ampliar a avaliação de sistemas WIM com FBG por meio de testes em campo com tráfego real, para além de cenários predominantemente controlados, limitadamente discutido na literatura;
- Aplicar técnicas de machine learning à calibração e à análise dos dados do sistema WIM, como diferencial em relação às abordagens mais convencionais apresentadas na literatura;
- Desenvolver um modelo de calibração do sensor, treinado a partir de dados obtidos em laboratório e em campo, de modo a relacionar a resposta óptica medida com a carga aplicada pelos veículos;
- Avaliar a viabilidade técnica da aplicação dos sensores propostos em sistemas reais de monitoramento de transporte, considerando aspectos como robustez, facilidade de implementação e adequação a ambientes operacionais.

## 1.2 Organização da tese

Esta tese está estruturada em seis capítulos principais, além dos elementos pré-textuais, referências e apêndices. O Capítulo 1 apresenta a introdução do tema, a contextualização do problema, os diferenciais da pesquisa e os objetivos geral e específicos, além das produções científicas e tecnológicas decorrentes desta tese. O Capítulo 2 reúne a fundamentação teórica, abordando os sensores em configuração SMS, os sensores baseados em redes de Bragg em fibra e os princípios físicos que sustentam ambas as tecnologias. O Capítulo 3 apresenta os trabalhos relacionados da revisão bibliográfica realizada que serviram como base para construção desta tese, bem como destaca as principais contribuições deste trabalho em relação ao estado da arte. O Capítulo 4 descreve a metodologia adotada, dividida em duas vertentes: a construção, instrumentação e validação do sensor SMS para detecção ferroviária e o desenvolvimento do sistema WIM baseado em FBG, incluindo ensaios laboratoriais, testes de campo e modelagem dos dados. O Capítulo 5 apresenta os resultados e discussões de cada uma dessas vertentes experimentais. Por fim, os Capítulos 6 e 7 trazem, respectivamente, as conclusões do trabalho e as sugestões para pesquisas futuras, seguidos das referências bibliográficas e dos apêndices com materiais complementares.

## 1.3 Produção científica e tecnológica decorrente da tese

Durante o desenvolvimento desta tese, os resultados obtidos deram origem a produções científicas e tecnológicas diretamente relacionadas à pesquisa, incluindo artigos publicados em periódicos internacionais, artigos submetidos, trabalhos publicados em anais de eventos e depósitos de patentes. Essas produções reforçam a relevância acadêmica, científica e aplicada do estudo, além de evidenciarem seu potencial de contribuição para o avanço do sensoriamento óptico aplicado ao monitoramento de transporte.

- **Artigos publicados em periódicos internacionais**

1. de Oliveira, W. F., Maia, L. S. P., Miranda, J. I. S., da Silva, A. R., Silveira, A. B., Bandeira, D. G. C., Sombra, A. S. B., & Guimarães, G. d. F. (2026). SMS Fiber-Optic Sensing System for Real-Time Train Detection and Railway Monitoring. *Photonics*, 13(3), 308. <<https://doi.org/10.3390/photonics13030308>>.

- **Artigos submetidos em periódicos**

1. OLIVEIRA, W. F. de; BRAGA, C. H. C.; MIRANDA, J. I. S.; MAIA, L. S. P.; SILVA,

A. R. da; SOMBRA, A. S. B.; GUIMARÃES, G. de F. *Distributed and Non-destructive Optical Sensor for Detecting and Measuring the Weight and Speed of Motor Vehicles in Single Tracks.*

- **Trabalhos publicados em anais de eventos**

1. OLIVEIRA, W. F.; BRAGA, C. H. C.; SOMBRA, A. S. B.; GUIMARÃES, G. F. *Distributed Fiber Optic Sensor for Traffic Flow Detection in Single Tracks.* In: *XV Symposium of Lasers and its Applications*, Recife, 2023.

- **Patentes depositadas**

1. OLIVEIRA, W. F.; BRAGA, C. H. C.; SOMBRA, A. S. B.; SILVA, A. R.; GUIMARÃES, G. F.; MIRANDA, J. I. S.; MAIA, L. S. P. Sensor óptico para detecção, classificação e aferição de peso e velocidade de veículos automotores. Depósito de patente. INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Número de registro: BR10202501409. Depósito em 08/07/2025.

2. GUIMARÃES, G. F.; OLIVEIRA, W. F.; CORREIA, D. G.; ALEXANDRIA, A. R.; SILVEIRA, A. B.; MIRANDA, J. I. S.; MAIA, L. S. P.; MARINHO, T. B.; BRAGA, C. H. C.; SILVA, A. R.; ROCHA, D. S.; MENDONÇA, F. A.; DE CARVALHO BELCHIOR MAGALHÃES, F. T.; ALBUQUERQUE, P. U. B.; B. JUNIOR, M. H.; GADELHA, W. C. C.; NOBRE, E. S. S.; LAURINDO, E. S. Sistema embarcado para monitoramento remoto de veículos leves sobre trilho utilizando sensoriamento óptico. Depósito de patente. INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Número de registro: BR10202600019. Depósito em 06/01/2026.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

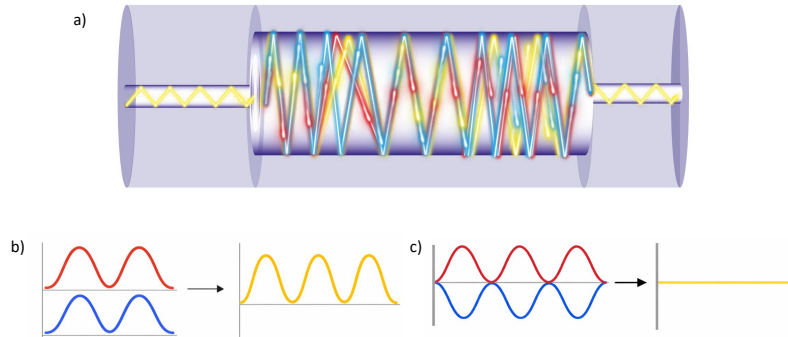
Esta seção de fundamentação teórica está organizada em duas seções principais, de modo a sustentar, de forma coerente, os dois sistemas sensores investigados nesta tese com base no panorama do conhecimento já consolidado na literatura apresentada no Capítulo 3. A primeira seção é dedicada a sensores baseados na configuração SMS e inclui a descrição do princípio de funcionamento fundamentado no fenômeno de interferência modal, detalhando como perturbações mecânicas, como vibrações induzidas pela passagem de trens, afetam a propagação e a recombinação dos modos, resultando em modulação do sinal óptico detectado. A segunda seção trata de sensores baseados em redes de Bragg em fibra e contempla a explicação do princípio de funcionamento associado à condição de Bragg, ressaltando a relação entre deformação e/ou temperatura e o deslocamento do comprimento de onda refletido, aspecto essencial para a interpretação do sensor de peso em movimento.

### 2.1 Interferência Multimodal

A propagação da luz em fibras ópticas multimodo caracteriza-se pela excitação simultânea de múltiplos modos guiados, cada um associado a um perfil transversal específico e a constantes de propagação distintas. Como consequência disso, esses modos propagam-se com diferentes velocidades de fase e acumulam atrasos relativos ao longo do comprimento da fibra, conforme mostra a Figura 1, logo quando a fibra multimodo é submetida a perturbações mecânicas externas, como deformações, curvaturas ou vibrações, as condições de propagação desses modos são modificadas, resultando em variações nas suas fases relativas (Valente *et al.*, 2023; Wang, 2024).

Essa diferença de fase entre os modos propagantes dá origem ao fenômeno conhecido como interferência multimodal ou interferência intermodal. Dependendo da relação de fase entre os modos no ponto de recombinação ou detecção, pode ocorrer interferência construtiva, Figura 1(b), quando os modos estão em fase e a intensidade óptica resultante é maximizada, ou interferência destrutiva, Figura 1(c), quando os modos estão em oposição de fase, levando à redução parcial ou total da intensidade do sinal óptico na saída da fibra. Assim, pequenas variações nas fases modais podem resultar em mudanças significativas na intensidade óptica detectada. Em outras palavras, a propagação simultânea de múltiplos modos em fibras multimodo resulta na formação de padrões espaciais de interferência construtiva e destrutiva que se

Figura 1 – Interferência multimodal em uma fibra multimodo. A subfigura (a) ilustra a propagação do sinal e a formação de interferência multimodal dentro da fibra, enquanto as subfiguras (b) e (c) mostram os sinais ópticos resultantes sob interferência construtiva e destrutiva, respectivamente.



Fonte: Autor (2026).

alternam periodicamente ao longo da direção de propagação da luz. Esse comportamento está diretamente associado ao fenômeno de autoimagem (*self-imaging*), no qual o perfil do campo óptico incidente na entrada da fibra multimodo é reproduzido periodicamente ao longo de seu comprimento devido à superposição coerente dos modos guiados. A posição e a periodicidade dessas autoimagens dependem das propriedades geométricas e ópticas da fibra multimodo, bem como do comprimento de onda da luz incidente (Soltani *et al.*, 2024; Pérez-Armenta *et al.*, 2022).

É importante distinguir os papéis desempenhados pelas fibras monomodo e multimodo em sistemas baseados em interferência multimodal. As fibras monomodo são amplamente empregadas em sistemas de telecomunicações devido à sua baixa atenuação e à propagação exclusiva do modo fundamental, o que minimiza efeitos de dispersão modal e confere elevada estabilidade frente a perturbações externas. Em contraste, as fibras multimodo suportam a propagação simultânea de diversos modos transversais, cada um com uma constante de propagação distinta, tornando-as intrinsecamente mais sensíveis a alterações no ambiente externo (Agrawal, 2021). A superposição desses modos na fibra multimodo leva à formação de padrões de interferência construtiva e destrutiva ao longo da propagação, originando flutuações espaciais e temporais da intensidade óptica que estão diretamente associadas ao fenômeno de autoimagem citado anteriormente, no qual o campo óptico de entrada é periodicamente reconstruído ao longo da fibra multimodo. Qualquer perturbação externa que modifique as condições de propagação, tais como deformação mecânica, curvatura ou vibração, altera as fases relativas entre os modos,

deslocando o padrão de autoimagem e, conseqüentemente, modificando a distribuição de intensidade óptica ao longo da fibra (Udd e Spillman, 2011). Esse mecanismo estabelece uma relação direta entre estímulos mecânicos externos e variações mensuráveis no sinal óptico, tornando as fibras multimodo altamente adequadas para aplicações de sensoriamento. Em particular, vibrações induzidas por fontes externas provocam variações dinâmicas nas fases modais, resultando em modulações temporais da intensidade óptica que podem ser detectadas por sistemas de aquisição apropriados.

O sistema de sensoriamento baseado na configuração SMS explora diretamente esses princípios físicos, de modo que quando a luz proveniente de uma fibra monomodo é acoplada a uma fibra multimodo, múltiplos modos guiados são excitados. À medida que esses modos se propagam ao longo da fibra multimodo, eles interferem construtiva e destrutivamente, formando padrões de autoimagem espacialmente periódicos. A fibra monomodo de saída atua como um elemento seletivo, acoplando apenas uma fração específica do campo resultante, de modo que alterações no padrão de interferência se traduzem em variações detectáveis da potência óptica transmitida, dessa forma, perturbações mecânicas externas, como vibrações causadas pela passagem de trens sobre os trilhos, alteram as relações de fase entre os modos propagantes na fibra multimodo, modificando a intensidade e o perfil do padrão de autoimagem. Essas alterações resultam em variações mensuráveis na potência óptica na saída do sistema SMS, constituindo o princípio físico fundamental que permite a detecção de vibrações por meio da interferência multimodal. Esse comportamento justifica a aplicação da configuração SMS como um elemento sensorial sensível, simples e eficaz para monitoramento de vibrações em estruturas de transporte.

Para melhor compreensão desse fenômeno, será feita uma descrição matemática por meio de uma abordagem analítica baseada na propagação do campo óptico na seção de fibra multimodo. Sabendo que a propagação do campo óptico na região da fibra multimodo da estrutura SMS pode ser descrita por uma expansão modal, de modo que o campo elétrico total  $E(r,z)$  é representado como a soma ponderada das contribuições de todos os modos de excitação guiados na fibra multimodo, conforme expresso por (Snyder e Love, 1983):

$$E(r,z) = \sum_m A_m(r) e^{j\beta_m z}. \quad (2.1)$$

Onde  $A_m(r)$  representa a distribuição do campo transversal do  $m$ -ésimo modo guiado e  $\beta_m$  é sua constante de propagação. A intensidade óptica total na saída da fibra multimodo resulta da interferência entre esses modos:

$$I(z) = \left| \sum_m A_m e^{j\beta_m z} \right|^2. \quad (2.2)$$

Em condições estáticas, a diferença de fase relativa entre quaisquer dois modos  $m$  e  $n$  é dada por:

$$\Delta\phi_{mn} = (\beta_m - \beta_n)L. \quad (2.3)$$

Onde  $L$  é o comprimento da MMF. A interferência construtiva ocorre quando  $\Delta\phi_{mn}$  satisfaz a condição de autoimagem, resultando no acoplamento óptico máximo à SMF de saída (Mejia-Aranda *et al.*, 2013). Quando a MMF é acoplada mecanicamente ao trilho, as vibrações induzidas pela passagem de um trem introduzem uma perturbação dependente do tempo no comprimento da fibra:

$$L(t) = L_0 + \Delta L(t). \quad (2.4)$$

Bem como pequenas variações no índice de refração efetivo de cada modo devido à deformação e aos efeitos fotoelásticos:

$$n_{\text{eff},m}(t) = n_{\text{eff},m0} + \Delta n_{\text{eff},m}(t). \quad (2.5)$$

Como resultado, as constantes de propagação modal tornam-se dependentes do tempo:

$$\beta_m(t) = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff},m}(t). \quad (2.6)$$

Substituindo (4)–(6) em (3), a diferença de fase entre os modos torna-se:

$$\Delta\phi_{mn}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \Delta n_{\text{eff}} L_0 + \Delta n_{\text{eff}} \Delta L(t) + L_0 \Delta(\Delta n_{\text{eff}}(t)) \right]. \quad (2.7)$$

Esta expressão mostra que as vibrações modulam dinamicamente a acumulação de fase relativa entre os modos guiados, mesmo para deslocamentos mecânicos muito pequenos

(Snyder e Love, 1983). A modulação da intensidade óptica, ou seja, a intensidade óptica resultante na saída da SMF, torna-se dependente do tempo:

$$I_{\text{out}}(t) \propto 1 + \sum_{m \neq n} \cos [\Delta\phi_{mn}(t)]. \quad (2.8)$$

Indicando que a modulação de fase induzida por vibração se traduz diretamente em modulação de amplitude do sinal óptico transmitido. O fotodetector converte essa variação de intensidade óptica em um sinal elétrico:

$$V_{\text{out}}(t) = RI_{\text{out}}(t). \quad (2.9)$$

Onde  $R$  é a responsividade do fotodiodo. Durante a passagem do trem, a excitação mecânica aumenta significativamente  $\Delta L(t)$  e  $\Delta n_{\text{eff}}(t)$ , resultando em flutuações temporais pronunciadas em  $V_{\text{out}}(t)$ . Essas flutuações servem como um indicador confiável de eventos de vibração associados à presença de um trem.

A perturbação de fase induzida pela vibração também causa uma mudança na condição de autoimagem, (Maia *et al.*, 2022) que pode ser expressa através da relação de interferência dependente do comprimento de onda:

$$\lambda = \frac{(m-n)[2(m+n)-1]L(t)}{8(2N+1)n_{\text{core}}a^2}. \quad (2.10)$$

Isso mostra explicitamente que variações no comprimento efetivo da MMF  $L(t)$  levam ao deslocamento dinâmico dos picos de interferência construtiva e, conseqüentemente, a mudanças mensuráveis na intensidade transmitida em um comprimento de onda de operação fixo.

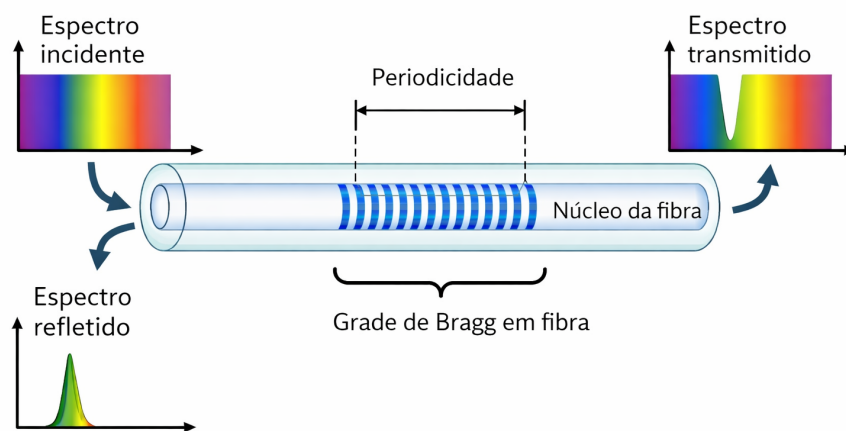
Portanto, as vibrações induzidas pelo trem de ondas são transduzidas em flutuações mensuráveis de intensidade óptica por meio da modulação dependente da vibração da acumulação de fase multimodo e das condições de autoimagem na estrutura da fibra SMS (Gao *et al.*, 2018).

## 2.2 Condição de Bragg

As Grades de Bragg em Fibra, do inglês, *Fiber Bragg Gratings* são microestruturas periódicas inscritas no núcleo de fibras ópticas, no geral monomodo, tipicamente com alguns

milímetros de comprimento, produzidas por meio da exposição transversal da fibra à radiação ultravioleta através de uma máscara de fase, induzindo uma modulação permanente e periódica do índice de refração da sílica. A Figura 2 apresenta um esquema ilustrativo do princípio de funcionamento de uma FBG, evidenciando a periodicidade da modulação no núcleo da fibra, bem como o comportamento espectral do sinal incidente, refletido e transmitido. Essa modulação cria uma estrutura ressonante que atua como um espelho seletivo em comprimento de onda, refletindo apenas uma faixa espectral estreita centrada no comprimento de onda de Bragg, enquanto os demais componentes do espectro são transmitidos ao longo da fibra. Dessa forma, o comprimento de onda refletido é essencialmente definido pelo período da microestrutura e pelo índice de refração efetivo do núcleo, de modo que a estrutura é simétrica e reflete o mesmo comprimento de onda independentemente do sentido de propagação da luz (Vieira *et al.*, 2015; Chourasia e Katti, ).

Figura 2 – Esquema ilustrativo do princípio de funcionamento de uma Grade de Bragg em Fibra, destacando a modulação periódica do índice de refração no núcleo da fibra e os espectros incidente, refletido e transmitido.



Fonte: Autor (2026).

Os sensores FBG são classificados como sensores ópticos modulados em frequência (ou comprimento de onda), pois o parâmetro físico monitorado, como deformação ou temperatura, está diretamente associado ao deslocamento do comprimento de onda refletido, o qual depende da condição de ressonância de Bragg. Diferentemente de sensores baseados em intensidade óptica, a medição em FBG é intrinsecamente independente da potência da fonte luminosa, uma vez que a informação está codificada espectralmente. Dessa forma, flutuações decorrentes de perdas

ópticas ao longo da fibra ou variações na intensidade da fonte não afetam significativamente a grandeza medida (Krohn *et al.*, 2014; Grattan e Sun, 2000).

Quando submetida a deformação mecânica, a fibra sofre alterações tanto no período da microestrutura quanto no índice de refração efetivo, devido ao efeito fotoelástico, resultando em deslocamento do comprimento de onda de Bragg. De modo análogo, variações térmicas podem alterar o índice de refração por efeito termo-ótico e, em menor escala, o próprio período da grade. Essa elevada sensibilidade espectral, aliada à imunidade a interferências eletromagnéticas, pequenas dimensões, baixo peso e confiabilidade a longo prazo, torna as FBGs particularmente adequadas ao monitoramento estrutural (Grattan e Sun, 2000; Neto *et al.*, 2014).

Uma das principais vantagens dessa tecnologia é a capacidade intrínseca de multiplexação, permitindo a inscrição de dezenas ou até centenas de grades ao longo de uma única fibra óptica, espaçadas por milímetros ou quilômetros, cada uma refletindo um comprimento de onda distinto. Essa característica possibilita o monitoramento distribuído de múltiplos pontos com uma única fonte óptica e um único sistema de interrogação, sem mistura significativa de sinais, desde que haja banda espectral suficiente para cada sensor (Vieira *et al.*, 2015). Assim, as FBGs consolidam-se como uma alternativa robusta e altamente versátil às tecnologias de sensores elétricos convencionais, especialmente em aplicações de monitoramento estrutural e medição de grandezas mecânicas.

Para melhor compreensão do fenômeno que descreve a variação no período da microestrutura quanto no índice de refração efetivo, devido ao efeito fotoelástico, tem-se que se uma FBG consiste em uma modulação periódica do índice de refração efetivo ao longo do núcleo da fibra óptica, com período  $\Lambda$ , logo a reflexão máxima ocorre quando as contribuições refletidas por cada plano da grade retornam em fase (interferência construtiva), condição conhecida como condição de Bragg (Agrawal, 2012). O comprimento de onda central refletido é dado por:

$$\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \Lambda. \quad (2.11)$$

Em que  $\lambda_B$  é o comprimento de onda de Bragg,  $n_{\text{eff}}$  é o índice efetivo do modo guiado e  $\Lambda$  é o período da grade (Vieira *et al.*, 2015).

Na aplicação desta tese, considera-se operação em temperatura constante, de modo que os deslocamentos espectrais observados decorrem predominantemente da deformação mecânica imposta à FBG. Assim, ao aplicar uma deformação axial  $\varepsilon$  na fibra, tanto o período da grade

quanto o índice efetivo sofrem pequenas variações, levando ao deslocamento do comprimento de onda refletido (Grattan e Sun, 2000).

Partindo da Eq. (2.11) e assumindo pequenas perturbações, obtém-se:

$$\Delta\lambda_B = 2(\Lambda\Delta n_{\text{eff}} + n_{\text{eff}}\Delta\Lambda). \quad (2.12)$$

Dividindo a Eq. (2.12) pela Eq. (2.11), chega-se à forma normalizada:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}. \quad (2.13)$$

O termo geométrico relaciona-se diretamente à deformação axial, pois a grade está inscrita na própria fibra; logo, o período  $\Lambda$  se alonga (ou se contrai) proporcionalmente (Agrawal, 2012):

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \approx \varepsilon. \quad (2.14)$$

Além disso, a deformação também altera o índice efetivo por efeito fotoelástico.

Para pequenas deformações, essa contribuição pode ser escrita como:

$$\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} = -p_e \varepsilon. \quad (2.15)$$

Em que  $p_e$  é o coeficiente fotoelástico efetivo. Substituindo as Eqs. (2.14) e (2.15) na Eq. (2.13), obtém-se a relação fundamental entre deslocamento espectral e deformação:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \varepsilon, \quad (2.16)$$

ou, de forma equivalente,

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e) \varepsilon. \quad (2.17)$$

A partir da Eq. (2.17), observa-se que a FBG atua como um transdutor óptico de deformação: a grandeza medida diretamente é o deslocamento  $\Delta\lambda_B$ , do qual se estima  $\varepsilon$ . Para que a FBG seja utilizada como sensor de peso (ou força normal aplicada), é necessário um elemento mecânico (estrutura de suporte, encapsulamento ou substrato) capaz de converter a carga aplicada em deformação axial na região onde a FBG está fixada (Kashyap, 2009).

Assumindo regime elástico linear, a deformação pode ser relacionada à força  $F$  por uma função de transferência mecânica:

$$\varepsilon = f(F). \quad (2.18)$$

Na qual  $f(\cdot)$  depende da geometria, do material e do método de fixação/encapsulamento do sensor. Conseqüentemente, combinando as Eqs. (2.17) e (2.18):

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)f(F). \quad (2.19)$$

Em particular, em configurações nas quais a deformação é aproximadamente proporcional à força (comportamento linear do conjunto mecânico), pode-se escrever:

$$\varepsilon \approx kF \quad \Rightarrow \quad \Delta\lambda_B \approx \lambda_B(1 - p_e)kF. \quad (2.20)$$

Onde  $k$  é a constante de conversão força–deformação do sistema mecânico. Como o peso  $P$  está associado à força aplicada ( $P \approx F$  sob condições quasi-estáticas), a Eq. (2.20) mostra que a estimativa do peso pode ser obtida a partir do deslocamento espectral, após calibração experimental do conjunto sensor–estrutura para determinar  $k$  (Kashyap, 2009; Agrawal, 2012).

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos trabalhos relacionados ao desenvolvimento e à aplicação de sensores ópticos em fibra voltados ao monitoramento de grandezas mecânicas e dinâmicas, com ênfase em contextos de engenharia e transporte. A literatura evidencia que diferentes configurações de sensores em fibra óptica vêm sendo exploradas para medição de deformação, vibração, carga, vazão, detecção veicular e pesagem em movimento, destacando-se pela imunidade a interferências eletromagnéticas, sensibilidade elevada e potencial de aplicação em ambientes adversos. Entre as diversas abordagens reportadas, sobressaem-se, neste trabalho, os sensores baseados em estruturas SMS e os sensores baseados em grades de Bragg em fibra, devido à relevância dessas tecnologias para os objetivos da tese.

Dessa forma, a revisão dos trabalhos relacionados foi organizada em três seções. A primeira reúne estudos associados a sensores do tipo SMS, enfatizando seus princípios de funcionamento, aplicações experimentais e limitações observadas em diferentes cenários. A segunda aborda pesquisas fundamentadas em sensores FBG, especialmente aquelas voltadas ao monitoramento estrutural, à detecção de veículos e aos sistemas de pesagem em movimento. Essa organização permite situar o estado da arte das duas tecnologias, evidenciando suas contribuições, desafios e lacunas, e fornecendo a base necessária para contextualizar a proposta desenvolvida nesta tese. Por fim, a terceira e última seção apresenta uma comparação crítica dos trabalhos correlatos do estado da arte, reunindo e contrastando abordagens, desempenhos e limitações reportadas na literatura para ambas as tecnologias sensoriais.

#### 3.1 Sensores de fibra SMS

Sensores baseados na configuração SMS têm se consolidado como uma alternativa simples, de baixo custo e altamente versátil dentro do universo de sensores em fibra óptica, sobretudo por explorarem a interferência intermodal no trecho multimodo para converter perturbações externas em mudanças mensuráveis no espectro de transmissão. Essa arquitetura, formada por duas fibras monomodo emendadas nas extremidades de uma fibra multimodo, é atrativa porque combina fabricação direta por emendas, boa repetibilidade e possibilidade de ajuste do comportamento espectral pela escolha do comprimento e diâmetro do segmento multimodo (Diaz *et al.*, 2024). Além disso, a literatura recente reforça que sensores SMS apresentam sensibilidade relevante a múltiplas grandezas ambientais e mecânicas, como temperatura, umidade

e deformação, permitindo a construção de plataformas de monitoramento com instrumentação relativamente acessível e potencial de integração em sistemas reais (Zhang *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2017). Nesse contexto, a crescente procura por sensores SMS está diretamente ligada à necessidade de soluções compactas, robustas e econômicas, capazes de operar em condições diversas e de serem adaptadas por meio de engenharia do trecho multimodo e do encapsulamento, o que sustenta sua relevância como tecnologia promissora para monitoramento ambiental e estrutural.

Kepak *et al.* (2016) propõem um sistema de monitoramento de vibração ferroviária baseado em fibras ópticas como alternativa imune à interferência eletromagnética (EMI), problema recorrente em sistemas ferroviários eletrificados, como o metrô de Praga. A solução fundamenta-se em um Sistema de Detecção por Fibra Óptica (FODS) estruturado a partir de um interferômetro de Mach-Zehnder (MZI), composto por acopladores ópticos 1×2 (50/50) e duas fibras monomodo de 2 m, sendo uma utilizada como braço de medição e outra como referência. A fonte óptica empregada foi um laser DFB (*Distributed Feedback Laser*) em 1550 nm (0 dBm), com detecção realizada por fotodetector amplificado e posterior filtragem em banda (8–20 kHz), aquisição por placa *National Instruments* e processamento via LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), incluindo análise no domínio do tempo e da frequência por meio de DFT (*Discrete Fourier Transform*) e FFT (*Fast Fourier Transform*) com janela de Hanning. O sistema foi instalado em dois pontos do metrô de Praga, com enlaces ópticos de até 1,3 km, demonstrando capacidade de detecção precisa da passagem de trens, registro de horários de chegada compatíveis com a programação oficial e cálculo de velocidade por meio da análise do ruído de impacto dos eixos, apresentando coeficiente de determinação de 98% em modelo recíproco ajustado. Como limitações, destacam-se a necessidade de intervalos de guarda (até 50 s) para mitigação de ecos e ruídos do túnel, implicando períodos de inatividade do sistema, bem como menor sensibilidade em frequências espectrais elevadas, o que impacta a linearidade na estimativa de velocidades mais altas. Ainda assim, o estudo evidencia o potencial da tecnologia interferométrica em fibra óptica como solução robusta e confiável para monitoramento ferroviário em ambientes com elevada EMI.

Gao *et al.* (2018) propõem um sensor de vibração acústica baseado em uma estrutura de fibra single-mode–multimode–single-mode com a fibra multimodo (MMF) quimicamente corroída por ácido fluorídrico, visando ajustar com precisão o ponto de autoimagem (*self-imaging point* – SIP) à junção com a fibra monomodo de saída e, assim, superar a dificuldade prática de

alinhamento exato nesses pontos, que compromete o acoplamento óptico e a sensibilidade. A corrosão foi monitorada por meio da intensidade óptica na saída (laser em 1550 nm e fotodiodo), e três comprimentos de MMF (2, 4 e 8 cm) foram avaliados quanto à resposta em frequência entre 20 e 500 Hz. Os resultados experimentais demonstram que a estrutura corroída com comprimento de MMF de 2 cm apresenta resposta adequada a ondas acústicas na faixa de 20 a 300 Hz, alcançando desempenho superior a 40 vezes em relação a sensores não corroídos, além de melhoria significativa com a redução do comprimento da MMF, sendo o melhor desempenho obtido com 2 cm, que apresentou sensibilidade de 1,49 mV/mPa e elevada linearidade ( $R^2 = 0,9980$ ) em 120 Hz. Apesar dos avanços, o estudo ressalta que desvios micrométricos em relação ao SIP ainda impactam o acoplamento e que aspectos mecânicos, como a distância entre pontos de fixação, influenciam diretamente a resposta vibracional, especialmente para maiores comprimentos de fibra.

Zhao *et al.* (2014) apresentam um sistema de sensoriamento de vibração baseado em uma estrutura de fibra SMS, na qual um segmento de MMF é inserido entre duas fibras monomodo (SMFs). O princípio de funcionamento fundamenta-se na interferência modal gerada na MMF, cujos padrões espectrais são modificados pela ação de vibrações, em decorrência do efeito fotoelástico que altera o perfil de índice de refração da fibra. Experimentalmente, utilizou-se uma fonte laser centrada em 1550 nm e um sistema vibratório composto por uma viga em balanço de fibra de carbono excitada por interação eletromagnética, garantindo sinal senoidal controlado. A aquisição e o processamento dos dados foram realizados por meio de dois arranjos: placa de aquisição com processamento computacional, que apresentou erro relativo inferior a 4%, e amplificador *lock-in* (SR830), que reduziu o erro para menos de 2% na faixa de 2 Hz a 80 Hz, alcançando sensibilidade de 4,7410 mV/Hz e comportamento linear entre tensão detectada e frequência de vibração. Embora o sistema tenha demonstrado boa sensibilidade e precisão, observa-se uma limitação associada ao método de aquisição empregado, havendo compromisso entre ampla faixa de medição e complexidade de processamento (placa de aquisição) e maior sensibilidade com faixa operacional reduzida (*lock-in*).

Zulkifli *et al.* (2016) propõem um sensor de carga baseado em uma estrutura de fibra SMS curvada, posicionada entre duas placas poliméricas de CR-39 (*Columbia Resin 39*), com o objetivo de possibilitar a medição de carga ou deformação transversal. O princípio de funcionamento fundamenta-se na variação do padrão de interferência modal na região da MMF quando submetida a esforços mecânicos. Experimentalmente, a estrutura foi inserida em um

dispositivo de aplicação de carga que promove estado uniforme de deformação plana, sendo o carregamento realizado por meio de massas suspensas em um braço mecânico. Investigou-se a influência da distância (D2) entre o ponto de fixação e a extremidade de entrada da MMF (3 cm e 7 cm), observando-se que maiores valores de D2 resultam em maior deformação transversal efetiva e, conseqüentemente, maior sensibilidade, atingindo  $-0,0102$  nm/mN para  $D2 = 7$  cm, em comparação a  $-0,0027$  nm/mN para  $D2 = 3$  cm. Verificou-se ainda deslocamento linear do comprimento de onda de pico para menores valores com o aumento da carga, bem como ampliação linear da largura de banda a 3 dB. Em comparação com um sensor baseado em FBG, avaliado em condições similares, a estrutura SMS apresentou sensibilidade significativamente superior, evidenciada por deslocamento espectral de 2,64 nm sob carga máxima, enquanto o FBG apresentou variação praticamente desprezível (0,005 nm). Como limitação, destaca-se a restrição física imposta pelo mecanismo de fixação, que limita o valor máximo de D2 em função do comprimento das placas e da necessidade de ancoragem segura. De modo geral, o trabalho demonstra que a estrutura SMS curvada constitui alternativa promissora para detecção de pequenas cargas e deformações transversais, apresentando maior faixa de medição e sensibilidade em comparação a sensores FBG convencionais.

Morshed *et al.* (2021) apresentam um sensor óptico baseado em estrutura SMS para medição de vazão em canais microfluídicos de PDMS (polidimetilsiloxano), explorando, de forma inédita, a interferência modal da fibra como mecanismo de detecção de escoamento. O princípio de funcionamento fundamenta-se no fenômeno de desprendimento de vórtices (*vortex shedding*), no qual a fibra multimodo imersa no canal atua como obstáculo ao fluxo, sofrendo microcurvaturas periódicas induzidas pelas forças hidrodinâmicas; tais deformações modulam a intensidade óptica transmitida. A estrutura foi composta por fibra *coreless* de sílica (125  $\mu$ m) fusionada entre duas SMF, com 4 mm imersos transversalmente ao canal microfabricado por moldagem em PDMS. Experimentalmente, utilizou-se laser operando na banda C (1563,86 nm), fotodetector InGaAs ((índio-gálio-arsênio) e sistema de aquisição de dados, sendo observadas frequências de oscilação para velocidades médias entre aproximadamente 18 e 33,75 cm/s, com Re (Número de Reynolds) entre 22,5 e 42,2, dentro do regime laminar. Os resultados indicaram elevada linearidade entre frequência detectada e vazão ( $R^2 \approx 0,99$ ), com sensibilidade de 1,7 mm/s/Hz, além de confirmação do comportamento esperado pela teoria do número de Strouhal. Contudo, verificaram-se desvios em relação ao modelo teórico, atribuídos à flexibilidade da fibra diferentemente do cilindro rígido assumido na teoria clássica, bem como limitações decorrentes

da complexidade da interferência multimodal, presença de harmônicos no espectro detectado, influência da frequência mecânica de ressonância da fibra, restrições dimensionais do canal e suscetibilidade a vibrações externas. Ainda assim, o trabalho demonstra o potencial da estrutura SMS como alternativa simples e promissora para medição de vazão em sistemas micro e macrofluídicos.

Chew *et al.* (2018) investigaram a aplicação de uma estrutura de fibra SMS como sensor de deformação compressiva em vigas de concreto armado, com o objetivo de mensurar deformações no regime elástico e superar limitações de sensores convencionais, como suscetibilidade à interferência eletromagnética, corrosão e curto-circuito em ambientes úmidos. A estrutura SMS foi confeccionada por meio da fusão de uma fibra multimodo de 6,8 cm entre duas fibras monomodo, sendo fixada com adesivo epóxi na superfície superior de uma viga de concreto armado de 3,12 m, projetada conforme o Eurocode (EC2). O carregamento foi aplicado em máquina universal de ensaios (*Instron*, 2000 kN), com incremento gradual de carga até 31 kN, mantendo-se o comportamento no regime elástico, e os resultados foram comparados a um extensômetro elétrico resistivo de referência. A análise espectral, realizada com fonte ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) na banda C (localizada aproximadamente entre 1530 nm e 1565 nm) e analisador de espectro óptico, evidenciou deslocamento linear do comprimento de onda para maiores valores (*red shift*) com o aumento da carga, apresentando sensibilidade de 3778,1 nm/mm para deformação, 0,014 nm/kN em função da carga aplicada e linearidade superior a 0,96, além de variação linear da potência de pico (-0,1089 nW/kN). Como limitações, destacam-se a avaliação restrita ao regime elástico, sem investigação em condições plásticas ou de ruptura, e a consideração de que efeitos térmicos são desprezíveis frente à deformação, aspecto que pode demandar compensação adicional em monitoramentos de longo prazo. De modo geral, o trabalho demonstra a viabilidade da estrutura SMS como alternativa sensível, linear e de menor complexidade em relação a sensores FBG para monitoramento estrutural em concreto armado.

Com o objetivo de sistematizar os principais estudos relacionados aos sensores na configuração SMS, a Tabela 1 reúne os trabalhos mais relevantes discutidos nesta seção, contemplando suas aplicações, princípios de funcionamento, resultados mais significativos e limitações. A partir dessa síntese, torna-se possível situar o desenvolvimento desta tese em relação ao estado da arte e identificar os aspectos em que a presente proposta avança em direção a aplicações ferroviárias em condições reais de operação.

Tabela 1 – Trabalhos correlatos com sensores SMS e tecnologias relacionadas.

Autor/Ano	Aplicação	Estrutura / Princípio	Principais resultados	Limitações
Kepak et al. (2016)	Monitoramento de vibração ferroviária e detecção de trens	Sistema interferométrico em fibra óptica baseado em <i>Mach-Zehnder</i> (MZI), com uma fibra de medição e outra de referência	Detecção precisa da passagem de trens no metrô de Praga; registro de horários compatíveis com a programação oficial; estimação de velocidade com coeficiente de determinação de 98%	Necessidade de intervalos de guarda para reduzir ecos e ruídos do túnel; menor sensibilidade em frequências altas, afeta medição em faixas mais elevadas
Zhao et al. (2014)	Sensor de vibração	Estrutura SMS com segmento MMF entre duas SMFs; resposta baseada na alteração da interferência modal causada por vibração	Faixa de operação de 2 a 80 Hz; erro relativo inferior a 4% com placa de aquisição e inferior a 2% com <i>lock-in</i> ; sensibilidade de 4,7410 mV/Hz; resposta linear entre tensão e frequência	Compromisso entre faixa de medição e sensibilidade, dependendo do método de aquisição adotado
Gao et al. (2018)	Sensor de vibração acústica	Estrutura SMS com fibra multimodo corroída quimicamente para ajuste do ponto de autoimagem	Melhor desempenho com MMF de 2 cm; resposta entre 20 e 300 Hz; desempenho mais de 40 vezes superior ao de sensores não corroídos; sensibilidade de 1,49 mV/Pa; $R^2 = 0,9980$ em 120 Hz	Sensível a desvios em relação ao ponto de autoimagem; influência de parâmetros mecânicos, como distância entre fixações
Zulkifli et al. (2016)	Sensor de carga / deformação transversal	Estrutura SMS curvada entre placas poliméricas de CR-39; variação espectral sob carregamento mecânico	Sensibilidade de $-0,0102$ nm/mN para $D2 = 7$ cm e $-0,0027$ nm/mN para $D2 = 3$ cm; deslocamento linear do pico espectral; desempenho superior ao de sensor FBG em condição semelhante	Restrição física do sistema de fixação
Morshed et al. (2021)	Medição de vazão em microcanais	Estrutura SMS em canal microfluídico de PDMS; detecção baseada em microcurvaturas induzidas por desprendimento de vórtices	Linearidade elevada entre frequência e vazão ( $R^2 \approx 0,99$ ); sensibilidade de 1,7 mm/s/Hz; operação em regime laminar	Desvios em relação ao modelo teórico; influência de harmônicos, ressonância mecânica da fibra e vibrações externas
Chew et al. (2018)	Monitoramento estrutural em concreto armado	Estrutura SMS fixada em viga de concreto armado para medir deformação compressiva	Deslocamento espectral linear com a carga; sensibilidade de 3778,1 nm/mm para deformação e 0,014 nm/kN para carga; linearidade superior a 0,96	Avaliação restrita ao regime elástico; efeitos térmicos não compensados
Diaz et al. (2024)	Revisão / fundamentos de sensores SMS	Discussão sobre arquitetura SMS, interferência intermodal e ajuste por comprimento e diâmetro da MMF	Reforça a versatilidade, simplicidade construtiva e possibilidade de ajuste espectral da configuração SMS	Trabalho de caráter mais conceitual, sem validação experimental específica para uma aplicação única
Zhang et al. (2013)	Aplicações gerais sensores SMS	Sensores SMS aplicados a diferentes grandezas ambientais e mecânicas	Evidencia sensibilidade relevante a parâmetros como temperatura, umidade e deformação	Não voltado especificamente para monitoramento ferroviário
Sun et al. (2017)	Aplicações gerais sensores SMS	Estruturas SMS para monitoramento multifuncional	Destaca potencial de integração e instrumentação em diferentes cenários	Discussão mais ampla, sem foco direto em transporte ferroviário

Fonte: Autor (2026).

### 3.2 Sensores de grade de Bragg em fibra

Sensores baseados em Grades de Bragg em FBG têm se consolidado como uma tecnologia altamente relevante para instrumentação e monitoramento por combinarem alta sensibilidade com uma forma de medição codificada em comprimento de onda, o que reduz a influência de flutuações de potência óptica e perdas ao longo da fibra. Além disso, por serem sensores totalmente dielétricos, apresentam imunidade a interferências eletromagnéticas, baixo peso, dimensões reduzidas e boa confiabilidade em longo prazo, tornando-se atrativos para ambientes industriais e aplicações de engenharia civil e transportes. Um diferencial importante é a capacidade intrínseca de multiplexação, permitindo medir múltiplos pontos ao longo de uma única fibra com mínima penalidade de perdas, viabilizando redes de sensores distribuídos para monitoramento de deformação, vibração e carga, inclusive em cenários dinâmicos, como sistemas de pesagem e detecção em movimento (Alhussein *et al.*, 2025; Vieira *et al.*, 2015), destacando-se nesta tese os sensores baseados em grade de Bragg aplicados à medição de peso em movimento.

Dubovan *et al.* (2018) investigaram a aplicação de FBG em sistemas experimentais WIM, com o objetivo de monitorar cargas veiculares e prevenir a sobrecarga de pavimentos, contribuindo para o aumento da vida útil das rodovias e para o desenvolvimento de sistemas inteligentes de transporte baseados em sensores fotônicos. O princípio de funcionamento fundamenta-se na variação do comprimento de onda de Bragg em função da deformação mecânica e da temperatura, descrita pela relação  $\Delta\lambda_B = K_1\varepsilon + K_2\Delta T$ , cujas constantes são determinadas por calibração. O sistema experimental foi implantado no campus da *University of Zilina* (UNIZA), integrando laços indutivos e um arranjo de FBGs operando em diferentes comprimentos de onda centrais (1512, 1536, 1545 e 1559 nm), além de uma solução comercial composta por 36 FBGs duplas para medição de pressão e uma para compensação térmica, totalizando 74 sensores conectados a um interrogador multicanal com taxa máxima de aquisição de 2000 Hz. Os resultados demonstraram a funcionalidade do sistema na detecção da passagem de veículos, identificação de eixos dianteiros e traseiros e análise da distribuição de carga entre lados do veículo. Entretanto, verificou-se que a taxa inicial de aquisição de 100 Hz é insuficiente para obtenção de dados plenamente representativos, demandando aumento significativo da frequência de amostragem. Adicionalmente, destacam-se desafios relacionados à calibração para determinação da carga real, modelagem do comportamento mecânico do pavimento, gerenciamento do elevado volume de dados e categorização veicular. Assim, embora o sistema experimental com FBG apresente potencial para aplicações em WIM e sistemas inteligentes de transporte, ainda requer

aprimoramentos em processamento de dados, calibração e otimização da taxa de aquisição para viabilização prática em larga escala.

Conforme relatado por Al-Tarawneh *et al.* (2020), foi desenvolvido um sistema WIM para pavimentos flexíveis baseado em sensores de FBG tridimensionais encapsulados em polímero reforçado com fibra de vidro (3D GFRP-FBG). O sistema estima o peso dos veículos a partir das deformações induzidas no pavimento, considerando a influência simultânea de deformação mecânica e temperatura na variação do comprimento de onda de Bragg. A modelagem estrutural foi realizada por meio da teoria das camadas elásticas para pavimentos flexíveis, com validação experimental em campo utilizando um caminhão de peso conhecido em diferentes velocidades. Os resultados indicaram alta sensibilidade dos sensores à profundidade de instalação, às propriedades do material asfáltico e à posição da carga, sendo o componente vertical o mais sensível.

A acurácia inicial variou entre aproximadamente 86% e 90%, sendo reduzido o erro para menos de 5,5% após a aplicação de metodologia de correção da posição de carga. Apesar do desempenho promissor e da elevada repetibilidade, os autores destacam a necessidade de aprimoramentos relacionados à calibração, influência de variáveis ambientais e modelagem do comportamento do pavimento para aplicação prática em larga escala.

Em um outro trabalho, Al-Tarawneh e Huang (2017) relataram o uso de sensores de FBG encapsulados em polímero reforçado com fibra de vidro (3D GFRP-FBG) para aplicação em sistemas WIM em pavimentos flexíveis, com foco em medições em altas velocidades.

O sistema baseia-se na variação do comprimento de onda de Bragg em função das deformações induzidas pela passagem dos veículos. A modelagem do pavimento foi realizada por meio da teoria de sistemas multicamadas, com simulações numéricas para análise de sensibilidade quanto à profundidade de instalação e ao módulo de elasticidade do material. Os resultados experimentais demonstraram que o sensor é capaz de identificar eixos individuais em velocidades de até 55 mph, apresentando maior sensibilidade no componente vertical. Constatou-se que a sensibilidade aumenta com maior profundidade de instalação e com menor rigidez do material hospedeiro. Apesar do desempenho promissor, os autores destacam a necessidade de validações adicionais e análises complementares para aplicação prática em larga escala.

Outros trabalhos expandem a aplicação do sensor de FBG para além da medição de carga unicamente, como Alamandala *et al.* (2018) que propõe um sistema WIM baseado em sensores de FBG para monitoramento da resposta dinâmica de pontes e determinação de parâmetros de

veículos em movimento, cujo objetivo central é contribuir para o monitoramento estrutural de pontes, especialmente frente aos efeitos de envelhecimento da infraestrutura de transporte.

A metodologia baseou-se na construção de um modelo protótipo de ponte, no qual dois sensores FBG foram instalados na região central do vão, área sujeita a maiores esforços de tração. Os sensores foram posicionados com inclinação de  $45^\circ$  em relação ao eixo longitudinal da ponte e espaçados entre si, permitindo a análise da resposta estrutural à passagem de veículos com diferentes cargas e velocidades. A aquisição de dados foi realizada por meio de interrogador óptico de alta resolução, com taxa de amostragem de 1 kHz, registrando os deslocamentos do comprimento de onda de Bragg.

Os resultados experimentais demonstraram que a resposta dos sensores apresenta dois picos principais e um vale intermediário, associados às posições das rodas dianteira e traseira do veículo sobre o sensor. Verificou-se comportamento aproximadamente linear entre a variação do comprimento de onda e os parâmetros de carga e velocidade, com coeficientes de correlação em torno de 0,9. O sistema também permitiu estimar a distância entre eixos a partir da diferença temporal entre os picos registrados, apresentando valores próximos às dimensões reais do veículo ensaiado. Embora os resultados indiquem potencial para aplicação em monitoramento estrutural e sistemas BWIM (*Bridge Weigh-in-Motion*), os autores ressaltam a necessidade de análises adicionais e aprimoramentos experimentais para consolidação do método em condições reais de operação.

Em um outro trabalho, mais completo e robusto, Alamandala *et al.* (2021) exploraram, além de mais orientações das FBGs, uma roseta de deformação, uma modelagem matemática mais completa e a análise avançada da deformação principal, a partir do desenvolvimento de um sistema BWIM baseado em sensores de FBG para estimar parâmetros veiculares, como carga, velocidade e espaçamento entre eixos, a partir da resposta de deformação medida em uma ponte protótipo. O objetivo é superar limitações de métodos estáticos de pesagem, fornecendo informações dinâmicas relevantes para a gestão rodoviária.

A metodologia consistiu na instalação de dois sensores FBG em vigas longitudinais distintas, alinhados à trajetória do veículo, com diferentes orientações angulares ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ). Os sensores foram organizados em configuração tipo roseta para análise das deformações principais. O modelo experimental utilizou uma ponte em escala com vigas de material polimérico e um veículo simulado controlado remotamente. A aquisição de dados foi realizada por interrogador óptico conectado a computador, sendo os sinais processados numericamente para

remoção de ruídos e obtenção das curvas temporais de deformação, a partir das quais foram extraídos os parâmetros veiculares.

Os resultados indicaram elevada linearidade da resposta dos sensores (coeficiente de correlação próximo de 0,99) e boa repetibilidade das medições. A orientação a  $0^\circ$  em relação à linha de movimento apresentou maior sensibilidade, enquanto a orientação a  $90^\circ$  mostrou-se pouco eficaz para identificação dos picos de deformação. As estimativas de carga e velocidade apresentaram boa concordância com as simulações numéricas, com erros inferiores a 5% para a configuração mais adequada. Como limitações, o estudo destaca a baixa eficiência dos sensores posicionados a  $90^\circ$  e aponta que a ampliação do número de sensores poderia aumentar a precisão, porém com maior complexidade e custo do sistema. De modo geral, o trabalho demonstra a viabilidade técnica de um sistema BWIM baseado em FBG, ressaltando a importância da orientação adequada dos sensores para otimização do desempenho.

Huang *et al.* (2014) apresentam um sistema WIM em tempo real para pavimentos de concreto, baseado em sensores de FBG encapsulados em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP), visando maior durabilidade e resistência em comparação aos sensores elétricos convencionais, de forma que dois sensores tridimensionais foram instalados em pavimento de concreto na pista experimental MnROAD (EUA), sendo avaliados sob carregamento dinâmico de um caminhão de cinco eixos em diferentes velocidades.

Os resultados indicaram melhor desempenho do componente longitudinal, com erro inferior a 10% em baixa velocidade e inferior a 15% em maior velocidade. Observou-se redução da sensibilidade com o aumento da velocidade e limitação associada à baixa frequência de amostragem (10 Hz), que dificultou a distinção entre eixos próximos. Conclui-se que o sistema apresenta potencial para aplicação em WIM em pavimentos rígidos, embora melhorias na taxa de aquisição de dados e na robustez operacional sejam necessárias para aplicação em condições reais.

Zhang *et al.* (2017) apresentam uma metodologia sistemática para otimização do projeto de sistemas WIM, estabelecendo relações entre parâmetros como taxa de amostragem, frequência de corte, sensibilidade do sensor, faixa dinâmica e relação sinal-ruído (SNR). O objetivo é substituir práticas empíricas por um modelo teórico capaz de garantir maior precisão em medições de cargas veiculares em alta velocidade.

A validação foi realizada por meio de simulações e estudo de caso com dados experimentais da pista MnROAD (EUA), indicando que uma frequência de corte de 160 Hz,

associada a taxa de amostragem adequada, permite erro inferior a 5%. Os resultados demonstram que o desempenho do sistema depende diretamente do equilíbrio entre largura de banda e nível de ruído. Como limitações, destacam-se simplificações teóricas e validação restrita a um tipo de veículo, sendo recomendada a ampliação dos testes em condições reais de tráfego. Em síntese, o trabalho contribui com um modelo estruturado para o dimensionamento otimizado de sistemas WIM.

Outros trabalhos exploram, além da medição WIM, outras aplicações de sensores FBG para veículos e tráfego, como detecção de veículos, classificação e medição de velocidade, como apresenta, por exemplo, Fridrich *et al.* (2026) abordam o desenvolvimento e a validação de um sistema óptico portátil e não intrusivo baseado em sensores de grade de Bragg em fibra óptica para detecção veicular e medição de velocidade em superfície de pavimento. A proposta visa eliminar intervenções estruturais no pavimento, permitindo rápida instalação e reutilização em ambientes urbanos, com aplicação em sistemas inteligentes de transporte.

O sensor consiste em uma cinta reforçada com núcleo de alumínio e encapsulamento polimérico, projetada para garantir robustez mecânica e eficiente transferência de deformações à fibra óptica. A metodologia incluiu simulações numéricas bidimensionais e tridimensionais por elementos finitos para otimização estrutural, ensaios de caracterização mecânica do material encapsulante (silicone), avaliação de fadiga sob carregamento cíclico e análise da sensibilidade térmica. O sistema foi conectado a interrogador óptico para aquisição de dados, sendo validado experimentalmente com veículo de passeio e comparado a sistemas de referência, como radares e portas ópticas. O processamento dos sinais envolveu filtragem, identificação de picos associados aos eixos e correlação temporal entre sensores para cálculo da velocidade.

Os resultados demonstraram elevada precisão, com taxa de detecção de 99,92% e desvio máximo de  $\pm 1,5$  km/h na medição de velocidade. Observou-se ainda potencial para classificação veicular com base na amplitude e forma dos sinais registrados, além de robustez frente a interferências eletromagnéticas e condições climáticas adversas. A configuração com reforço central apresentou melhor compromisso entre sensibilidade e integridade estrutural. Como limitações, destacam-se a dependência atual de interrogador com alimentação externa, a necessidade de estratégias dedicadas de compensação térmica para aplicações de longo prazo, a ausência de algoritmo automático de classificação e a validação restrita a pista de faixa única. Em síntese, o estudo demonstra a viabilidade de uma solução portátil, não invasiva e de alta precisão para monitoramento de tráfego, embora requeira aprimoramentos para implantação

autônoma e aplicações em larga escala.

A Tabela 2 apresenta uma síntese dos principais trabalhos correlatos envolvendo sensores FBG, destacando as aplicações investigadas, as configurações empregadas, os principais resultados obtidos e as limitações reportadas na literatura. Essa sistematização permite visualizar, de forma comparativa, como essa tecnologia vem sendo explorada em sistemas de pesagem em movimento, monitoramento estrutural e detecção veicular.

Com base nos trabalhos resumidos na Tabela 2, observa-se que os sensores FBG vêm sendo amplamente empregados em aplicações relacionadas ao monitoramento de tráfego, à pesagem em movimento e à análise dinâmica de estruturas, apresentando resultados promissores quanto à sensibilidade, repetibilidade e capacidade de detecção. Entretanto, a literatura também evidencia limitações recorrentes, como dependência de calibração, influência de variáveis ambientais, necessidade de maiores taxas de amostragem e desafios associados à validação em condições reais de operação.

Tabela 2 – Trabalhos correlatos com sensores FBG.

<b>Autor/Ano</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Estrutura / Princípio</b>	<b>Principais resultados</b>	<b>Limitações</b>
Dubovan et al. (2018)	WIM em rodovias / monitoramento de cargas veiculares	Arranjo de FBGs para medição de deformação e temperatura em sistema experimental WIM; integração com laços indutivos e interrogador multicanal	Deteção da passagem de veículos, identificação de eixos e análise da distribuição de carga entre os lados do veículo; demonstrou potencial para sistemas inteligentes de transporte	Taxa inicial de aquisição de 100 Hz insuficiente; necessidade de melhorias em calibração, modelagem mecânica do pavimento, gerenciar dados e categorizar veicular
Al-Tarawneh et al. (2020)	WIM em pavimentos flexíveis	Sensores 3D GFRP-FBG encapsulados em polímero reforçado com fibra de vidro para estimativa de peso a partir da deformação no pavimento	Acurácia inicial entre 86% e 90%; após correção da posição da carga, erro inferior a 5,5%; elevada repetibilidade; maior sensibilidade no componente vertical	Dependência de calibração, influência de variáveis ambientais e necessidade de melhor modelagem do comportamento do pavimento
Al-Tarawneh e Huang (2017)	WIM em altas velocidades para pavimentos flexíveis	Sensores 3D GFRP-FBG encapsulados; análise baseada na variação do comprimento de onda de Bragg sob deformação	Identificação de eixos individuais em velocidades de até 55 mph; maior sensibilidade no componente vertical; sensibilidade aumentada com maior profundidade de instalação e menor rigidez do material hospedeiro	Necessidade de validações adicionais e estudos complementares para aplicação prática em larga escala
Alamandala et al. (2021)	BWIM com estimativa de carga, velocidade e espaçamento entre eixos	Sistema com sensores FBG em configuração tipo roseta, com orientações de 0°, 45° e 90°, para análise das deformações principais em ponte protótipo	Elevada linearidade ( $R^2 = 0,99$ ); boa repetibilidade; melhor desempenho para sensores orientados a 0°; erros inferiores a 5% na configuração mais adequada	Baixa eficiência dos sensores a 90°; aumento do número de sensores pode melhorar a precisão, mas eleva custo e complexidade
Huang et al. (2014)	WIM em tempo real para pavimentos de concreto	Sensores FBG encapsulados em GFRP, instalados em pavimento rígido para medição dinâmica da resposta ao tráfego	Melhor desempenho no componente longitudinal; erro inferior a 10% em baixa velocidade e inferior a 15% em maior velocidade; potencial para WIM em pavimentos rígidos	Redução da sensibilidade com aumento da velocidade; frequência de amostragem de 10 Hz insuficiente para distinguir eixos próximos
Fridrich et al. (2026)	Deteção veicular, medição de velocidade e potencial classificação de veículos	Sistema óptico portátil e não intrusivo baseado em FBG, encapsulado em cinta reforçada com núcleo de alumínio e material polimérico	Taxa de deteção de 99,92%; desvio máximo de $\pm 1,5$ km/h na medição de velocidade; potencial para classificação veicular; robustez frente a EMI e condições climáticas adversas	Dependência de interrogador com alimentação externa; necessidade de compensação térmica em longo prazo; ausência de algoritmo automático de classificação; validação restrita a pista de faixa única
Alamandala et al. (2018)	BWIM / monitoramento dinâmico de pontes	Dois sensores FBG instalados em ponte protótipo, na região central do vão, para análise da resposta dinâmica à passagem de veículos	Resposta com 2 picos principais associados aos eixos do veículo; comportamento aproximadamente linear entre deslocamento espectral e carga/velocidade; $R^2$ de 0,9	Necessidade de aprimoramentos experimentais e validações adicionais para consolidação em condições reais

Fonte: Autor (2026).

### 3.3 Comparação crítica dos trabalhos correlatos e posicionamento da tese

A análise dos trabalhos apresentados nas seções anteriores evidencia que os sensores ópticos em fibra, tanto na configuração SMS quanto na tecnologia FBG, vêm sendo aplicados com resultados promissores em diferentes contextos de monitoramento. Entretanto, apesar dos avanços reportados na literatura, observa-se que muitos estudos ainda permanecem concentrados em demonstrações experimentais controladas, frequentemente realizados testes de campo em ambiente minimamente controlado, análise de resultados ainda voltadas para métodos mais tradicionais, de modo que técnicas de análise com aplicação de *machine learning* ou aprendizado de máquina ainda são pouco reportadas, além de, no caso dos sensores SMS, a aplicação em sistemas de transporte ferroviário ainda é escassa. Nesse contexto, esta seção apresenta uma comparação crítica entre os principais trabalhos correlatos e as contribuições desta tese, reunindo e contrastando abordagens, desempenhos e limitações reportadas na literatura para ambas as tecnologias sensoriais.

No caso dos sensores na configuração SMS, os trabalhos de Gao *et al.* (2018) e Sun *et al.* (2017) constituem referências importantes por demonstrarem o potencial dessa estrutura para monitoramento de vibrações e respostas dinâmicas. Esses estudos confirmam que a configuração SMS apresenta boa sensibilidade e pode ser empregada na detecção de perturbações mecânicas, reforçando a viabilidade dessa tecnologia em medições vibracionais. No entanto, tais trabalhos se concentram sobretudo em aplicações gerais de vibração, sem avançar de maneira mais direta para um cenário ferroviário real, com diferentes composições e variabilidade operacional mais acentuada. Nesse sentido, embora Gao *et al.* (2018) e Sun *et al.* (2017) sustentem a base conceitual da utilização do sensor SMS para detecção de fenômenos vibratórios, a presente tese amplia significativamente essa perspectiva ao demonstrar sua aplicação em ambiente ferroviário real.

O principal diferencial deste trabalho está justamente em explorar uma aplicação ferroviária ainda pouco abordada experimentalmente com sensores SMS, especialmente com validação em campo e comparação entre diferentes tipos de veículos ferroviários. Enquanto em Gao *et al.* (2018) e Sun *et al.* (2017) o foco recai predominantemente sobre a resposta do sensor à vibração em si ou relacionado à acústica, nesta tese a análise é levada para um contexto operacional mais complexo, no qual o sensor é submetido a condições reais de uso, com ruídos de ambiente, deriva de linha de base e natureza não estacionária dos sinais. Além disso, o presente trabalho não se limita à simples detecção de passagem, mas mostra que as assinaturas

vibratórias associadas ao VLT, ao trem de carga e ao trem de manutenção apresentam diferenças coerentes, acrescentando uma dimensão prática e interpretativa que não aparece com o mesmo destaque nos trabalhos correlatos.

Outro aspecto que reforça a relevância desta tese frente a Gao *et al.* (2018) e Sun *et al.* (2017) está na estratégia de processamento de sinais adotada. Os resultados mostraram que abordagens baseadas na variabilidade do sinal, como derivada temporal e variância, são mais robustas em campo do que métodos apoiados em limiares absolutos, sobretudo diante da deriva de *baseline* e da variabilidade natural dos sinais reais. Assim, o avanço não está apenas na aplicação em contexto ferroviário, mas também na proposição de uma forma de análise mais aderente às condições efetivas de operação. A investigação no domínio da frequência reforça essa contribuição ao evidenciar concentração de energia em baixas frequências e diferenças espectrais entre os tipos de composição avaliados, mostrando que o sensor SMS, além de simples e de baixo custo, possui potencial para análises mais refinadas em monitoramento ferroviário.

Em relação aos sensores FBG, os estudos de Dubovan *et al.* (2018) e Al-Tarawneh *et al.* (2020) destacam-se como referências centrais para a aplicação dessa tecnologia em sistemas WIM. Dubovan *et al.* (2018) demonstraram a funcionalidade de um sistema experimental com FBG para detecção da passagem de veículos, identificação de eixos e análise de distribuição de carga, ressaltando o potencial da tecnologia para aplicações em transporte inteligente. Contudo, os autores também evidenciaram limitações relevantes, como a insuficiência de baixas taxas de aquisição, a necessidade de calibração mais robusta e os desafios associados ao tratamento do grande volume de dados. Já Al-Tarawneh *et al.* (2020) mostraram o uso de sensores 3D GFRP-FBG em pavimentos flexíveis, com resultados promissores na estimativa de peso veicular e boa repetibilidade experimental, mas também destacaram a influência da profundidade de instalação, das propriedades do pavimento, da posição da carga e da necessidade de correções adicionais para melhorar a acurácia.

Frente a esses trabalhos, o diferencial da presente tese está em combinar o desenvolvimento do sistema óptico-mecânico com uma análise mais abrangente e refinada dos dados, indo além da simples comprovação da resposta sensorial à passagem dos eixos. Enquanto Dubovan *et al.* (2018) e Al-Tarawneh *et al.* (2020) enfatizam principalmente a funcionalidade do sensor e sua sensibilidade em arranjos WIM, este trabalho integra calibração experimental, avaliação em laboratório, ensaios estáticos supervisionados em campo, testes em fluxo livre não controlado e exploração de técnicas de aprendizado de máquina para interpretação dos sinais. Essa integração

representa uma contribuição importante, pois aproxima o sistema das exigências de aplicação em cenários reais, nos quais a resposta do sensor precisa ser analisada de forma robusta diante de múltiplas variáveis de interferência.

Além disso, esta tese acrescenta uma perspectiva metodológica que amplia a contribuição observada em Dubovan *et al.* (2018) e Al-Tarawneh *et al.* (2020). Em vez de restringir a análise à demonstração da sensibilidade do sensor ou à resposta associada à passagem dos veículos, o presente trabalho busca extrair dos sinais informações mais robustas e úteis para futuras rotinas de predição. Assim, o sistema WIM com FBG desenvolvido nesta tese não apenas confirma o potencial da tecnologia para monitoramento veicular, já indicado na literatura, mas também avança no sentido de estruturar uma base experimental e analítica mais adequada para aplicações práticas futuras, inclusive com vistas à interpretação automatizada dos dados em condições reais de operação.

De modo geral, a comparação crítica com o estado da arte evidencia que esta tese avança em relação aos trabalhos centrais tomados como referência. No caso do sensor SMS, o trabalho amplia a linha representada por Gao *et al.* (2018) e Sun *et al.* (2017) ao transferir a tecnologia para uma aplicação ferroviária real, com validação em campo, comparação entre diferentes composições e processamento mais robusto dos sinais. No caso do sistema FBG, a tese se posiciona como um avanço em relação a Dubovan *et al.* (2018) e Al-Tarawneh *et al.* (2020) ao integrar desenvolvimento experimental, calibração, testes em múltiplas condições e análise avançada dos dados. Em ambos os casos, o principal diferencial está em aproximar as tecnologias sensoriais de cenários operacionais reais, contribuindo não apenas para a demonstração de sensibilidade, mas para o amadurecimento metodológico e aplicado dessas soluções no contexto do monitoramento em transportes em ambientes reais.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia desta tese foi organizada em duas vertentes complementares, correspondentes a dois sensores ópticos distintos, ambos testados e validados em condições de operação: um sensor em configuração SMS destinado à detecção de trens por meio da medição de vibração do trilho; e um sensor de peso em movimento baseado em redes de Bragg em fibra, voltado à estimativa de carga veicular a partir da deformação induzida na estrutura monitorada. Cada vertente contempla as etapas de concepção, construção do elemento sensor, encapsulamento/integração mecânica, montagem do sistema óptico-eletrônico e integração com rotinas de aquisição e processamento.

### 4.1 Construção do sensor SMS para detecção de trens por vibração

A construção do sensor de que se trata esta seção é dividida em três modalidades: óptica, mecânica e eletrônica. A metodologia de funcionamento do sensor baseia-se no princípio de interferência multimodal em fibras multimodo, no qual um segmento curto de fibra MMF é inserido entre duas SMFs, compondo a região sensora e o enlace de transmissão/recepção, respectivamente. O laço óptico fabricado em configuração SMS é alocado em uma estrutura mecânica que permite seu correto e seguro acoplamento ao trilho do trem, assegurando posicionamento e fixação adequados durante a operação em campo. Além disso, os cabos monomodo associados ao laço são conectados à eletrônica embarcada, viabilizando a propagação do sinal ao longo do enlace em laço e sua conexão tanto com a fonte de luz quanto com o dispositivo fotodetector responsável pela aquisição do sinal óptico.

#### 4.1.1 Construção do elemento sensor em configuração SMS

Como discutido anteriormente, o sensor foi implementado por meio da configuração SMS, na qual duas fibras monomodo são conectadas às extremidades de um curto segmento de fibra multimodo, aproximadamente 30 cm, formando o elemento sensível responsável pela modulação do sinal óptico em resposta a perturbações mecânicas. A construção do elemento sensor foi conduzida por meio da clivagem cuidadosa das extremidades das fibras, seguida de interconexão utilizando conectores do tipo SC/UPC, apresentados na Tabela 3, visando minimizar perdas de inserção, garantir repetibilidade do acoplamento e assegurar adequada qualidade de acoplamento óptico nas junções.

O trecho multimodo foi implementado com fibra comercial da *Thorlabs*, apresentada na Tabela 3, adotando-se como referência fibra monomodo com núcleo de  $8,2 \mu\text{m}$  e fibra multimodo com núcleo de  $105 \mu\text{m}$  para a região sensora com comprimento médio de 30 cm (Thorlabs, 2024a). No enlace de transmissão e recepção empregou-se fibra monomodo proveniente de cabo tipo *drop*, de 350 e 650 m, contendo quatro fibras internas, das quais duas foram utilizadas na operação do sistema e duas mantidas como reserva operacional para contingências em campo, fornecendo um alcance validado entre 350 e 650 m para este sensor.

Com o objetivo de investigar a influência da geometria sobre a sensibilidade e a robustez do sensor, foram avaliadas diferentes configurações do segmento multimodo, incluindo: posicionamento reto, curvaturas suaves e arranjos em laço com maior complexidade geométrica. A comparação entre as geometrias evidenciou que a resposta do sensor é fortemente dependente do arranjo mecânico imposto ao trecho multimodo, permitindo ajustar a sensibilidade do sistema e, simultaneamente, buscar maior estabilidade para operação em ambiente real.

A excitação óptica foi realizada por laser acoplado em fibra, modelo LSDL1550, apresentado e definido na Tabela 3, operando em torno de 1550 nm, com faixa espectral especificada entre 1530 nm e 1570 nm (AliExpress, 2026c). Para a fotodetecção utilizou-se fotodetector com entrada óptica, como o modelo FGA01FC da *Thorlabs*, pois as especificações de sensibilidade são compatíveis com a região do infravermelho, aproximadamente 800–1800 nm e 850–1650 nm (Thorlabs, 2017).

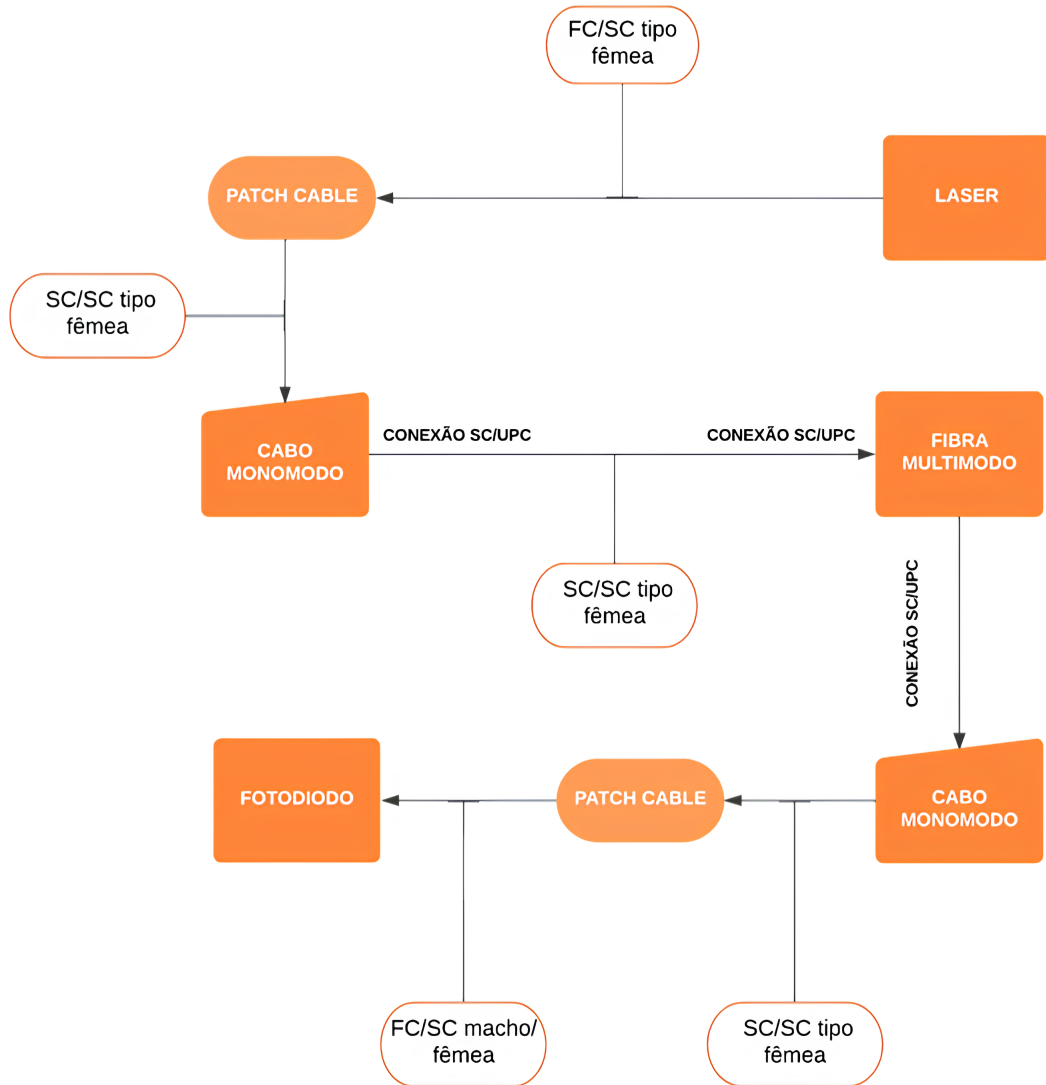
A alimentação e o condicionamento elétrico do laser foram implementados e testados com duas abordagens: divisor de tensão alimentado em 5 V, com resistores  $R_1 = 100\Omega$  e  $R_2 = 330\Omega$  e circuito com regulador Texas Instruments LM317T-DG, visando maior estabilização das condições elétricas de operação (Texas Instruments, 2026). Os componentes ópticos e eletrônicos foram acondicionados em caixa dedicada, adotando-se cuidados de montagem para reduzir suscetibilidade a ruídos e interferências externas.

Para proteção do trecho sensível e padronização da instalação no trilho, foi desenvolvido um suporte mecânico compatível com o perfil TR37 incorporando recursos para acomodação e travamento dos conectores SC/UPC, posicionamento paralelo para reduzir curvaturas excessivas e ranhuras laterais para fixação por grampos.

Para facilitar a visualização da interconexão entre os componentes e o sequenciamento da montagem do laço óptico, foi elaborado um diagrama de blocos com os principais elementos do arranjo experimental e suas ligações. A Figura 3 apresenta, de forma resumida,

o caminho óptico desde a fonte (laser), passando pelos cabos e pela fibra multimodo, até o fotodiodo responsável pela detecção do sinal, servindo como referência para a compreensão do *setup* adotado.

Figura 3 – Diagrama de blocos do laço óptico utilizado no *setup* experimental, mostrando a interconexão entre a fonte laser, *patch cables*, cabos monomodo, fibra multimodo e o fotodiodo.



Fonte: Autor (2026).

#### 4.1.2 Construção mecânica sensor

Visando proteger o elemento sensor e viabilizar sua instalação em campo, a fibra óptica foi alojada em um suporte mecânico impresso em 3D, projetado especificamente para perfis de trilho TR37, em conformidade com recomendações normativas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). O projeto do suporte teve como objetivos principais proteger o

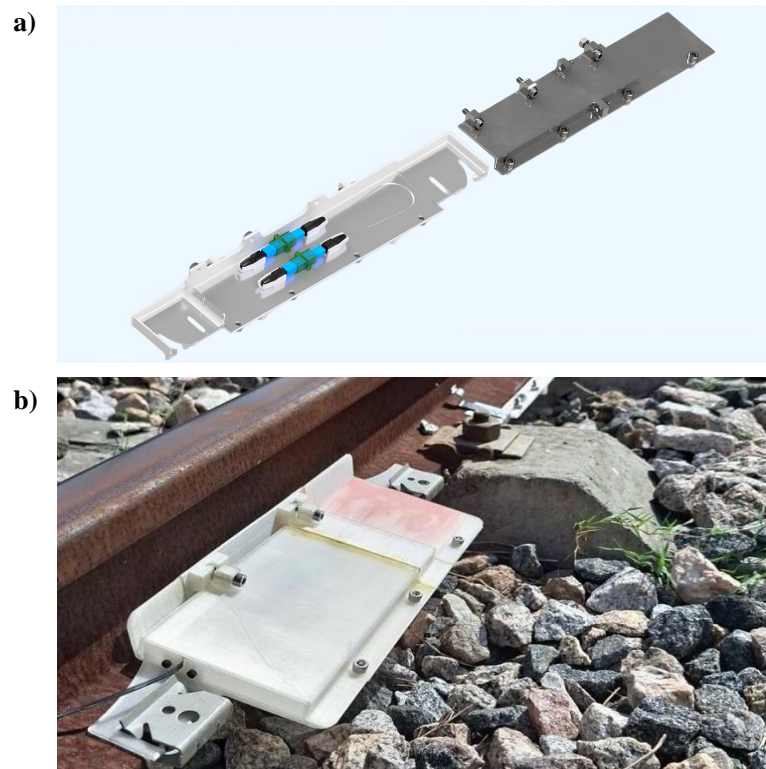
sensor e suas conexões, assegurar fixação e estabilidade mecânica, e respeitar o raio mínimo de curvatura de 16 mm, conforme recomendado para manuseio de curto prazo de fibras multimodo. O dimensionamento interno considerou o raio mínimo de curvatura recomendado para a fibra multimodo (16 mm em curto prazo e 32 mm em longo prazo), sendo prevista tampa para fechamento e proteção do conjunto. A estrutura foi modelada em *software* CAD (*Computer-Aided Design*) e composta por cinco placas intertravadas, montadas por porcas e parafusos, incorporando recursos mecânicos direcionados à instalação e ao condicionamento da fibra: cavidades dedicadas para posicionamento do trecho sensor, guias integrados para roteamento dos cabos, grampos para fixação, ranhuras para acomodação dos conectores e extrusões cônicas que auxiliam o acoplamento com conectores SC/UPC (Autodesk, 2023; Fibras Net SP, 2026). Para facilitar o manuseio durante montagem e implantação, as extremidades do suporte incluíram recortes curvos de 45°, reduzindo esforços mecânicos locais e contribuindo para a integridade da fibra.

A fabricação do suporte foi realizada por impressão 3D utilizando PLA (*Polylactic Acid*), permitindo prototipagem rápida e ajustes iterativos de projeto. Durante a implantação em campo, a fibra foi inserida no suporte e fixada com grampos metálicos de grau industrial, e os aspectos dimensionais do conjunto foram verificados para garantir encaixe adequado, proteção das conexões e confiabilidade operacional. O protótipo desenvolvido para a fixação do sensor de vibração ao trilho demonstrou robustez e acomodação eficaz do sensor em condições reais e está devidamente representada na Figura 4. De modo que a Figura 4 (a) mostra a modelagem 3D da estrutura projetada, enquanto a Figura 4 (b) é apresentado o protótipo após a impressão, já instalado no trilho durante a realização dos testes em campo.

O suporte mecânico a ser conectado ao trilho do trem deve conter a fibra multimodo responsável pela detecção do trem por meio da captação da vibração. Para garantir uma fixação mais eficaz da fibra sensora ao suporte, foram adicionadas peças de contorno para os conectores SC-UPC, impedindo seu deslocamento dentro do suporte. Os conectores foram posicionados em paralelo para evitar curvaturas excessivas na fibra, mantendo assim a integridade do sinal. A Figura 4 (a) ilustra como a fibra multimodo, apresentada na linha 8 da Tabela 3, é acomodada dentro do suporte dentro de ranhuras internas. Logo, a fibra multimodo é acoplada em ambas as extremidades a conectores SC/UPC, apresentado na linha 2 da Tabela 3, que estão devidamente ilustrados em seu posicionamento real na Figura 4 (a). A conexão da fibra sensora multimodo aos cabos de transmissão monomodo, apresentada na linha 4 da Tabela 3, é realizada por meio

de adaptadores SC/SC tipo fêmea, apresentados na linha 5 da Tabela 3, uma vez que assim como a fibra multimodo, as fibras monomodos também são conetadas em suas extremidades por conectores SC/UPC.

Figura 4 – Protótipo mecânico do sensor de vibração para fixação em trilhos ferroviários: (a) modelagem 3D do suporte mecânico; (b) Sensor impresso e instalado no trilho durante os testes em campo.



Fonte: Autor (2026).

#### 4.1.3 Eletrônica embarcada

A instrumentação eletrônica do sistema foi projetada para acionar e alimentar a fonte de luz, realizar a leitura do sinal proveniente do fotodetector, condicionar esse sinal para adequação à conversão analógico-digital e automatizar a aquisição e transmissão dos dados para processamento em computador. A alimentação do conjunto é realizada por bateria, de modo a viabilizar operação embarcada e reduzir dependência de infraestrutura externa durante as aferições.

O sistema de leitura é composto por um fotodetector que, ao receber a potência óptica na saída da fibra, atua como um dispositivo de conversão optoeletrônica, produzindo um sinal elétrico equivalente. Do ponto de vista elétrico, o fotodetector pode ser interpretado como uma fonte de corrente quando ativado pela radiação incidente. Para possibilitar a leitura

em forma de tensão, o circuito integra uma resistência de carga, responsável pela conversão corrente-tensão, além de um estágio de filtragem, cuja função é mitigar ruídos e interferências de alta frequência e, conseqüentemente, estabilizar o sinal disponibilizado ao sistema de aquisição.

O fotodetector foi conectado a uma placa de circuito impressa (PCI), responsável por garantir a alimentação adequada do conjunto e preparar o sinal elétrico para amostragem pelo microcontrolador. Inicialmente, a PCI foi modelada em *software* de projeto eletrônico (*EasyEDA*), visando definir a topologia do circuito, o posicionamento dos componentes e as trilhas da placa (*EasyEDA*, 2023). Essa etapa de projeto permitiu o desenvolvimento de um circuito capaz de receber o sinal elétrico associado ao sinal óptico na saída da fibra e disponibilizá-lo de forma apropriada para instrumentos de bancada, por exemplo, osciloscópio, e, posteriormente, para a aquisição embarcada, etapa essencial para a validação do comportamento do sensor em condições controladas e para a transição para ensaios em ambiente relevante.

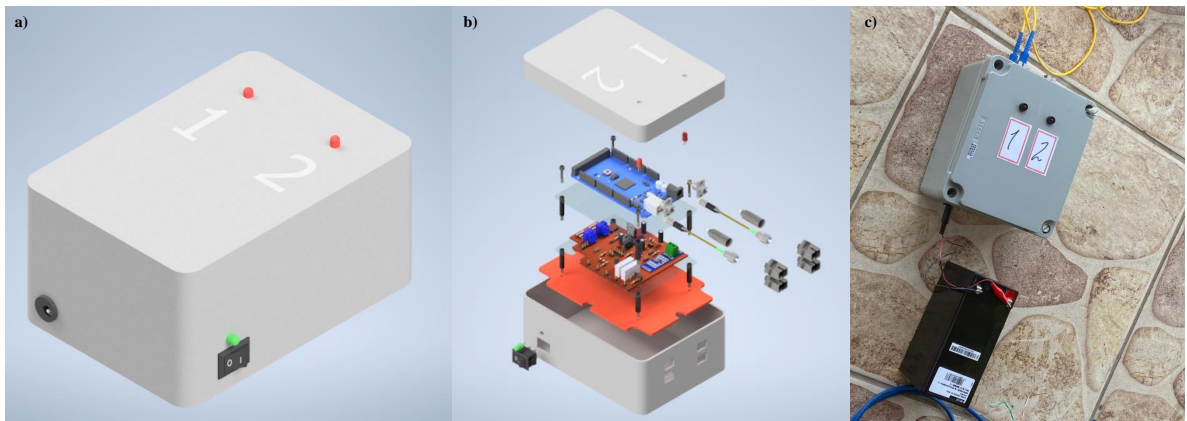
Após a confecção da placa, realizou-se a integração da PCI com o conjunto de *hardware* embarcado e com o *setup* experimental. O sistema microcontrolado, implementado com o Arduino Mega, tem a função de automatizar a coleta de dados, executando a leitura do sinal condicionado, realizando a conversão analógico-digital e organizando os dados em formato adequado para armazenamento e transmissão (*Arduino*, 2024). A comunicação com o computador é feita por interface USB (*Universal Serial Bus*), operando como canal de dados para um *software* de análise numérica e processamento de sinais. Essa integração viabiliza o acompanhamento do comportamento do sinal em tempo real e o registro contínuo das amostras para análise posterior, mantendo a separação funcional entre: estágio optoeletrônico (fotodetecção), condicionamento analógico (PCI) e aquisição e comunicação (Arduino Mega).

O *firmware* embarcado foi estruturado de forma modular, contemplando, de maneira simplificada, dois blocos principais: um módulo de conversão analógico-digital (ADC) aplicado ao sinal condicionado pela PCI e um módulo de disponibilização dos dados em porta serial, permitindo que o microcomputador receba, armazene e processe os dados adquiridos. Assim, o sistema embarcado é responsável pela aquisição, leitura, tratamento preliminar e armazenamento temporário, enquanto o computador realiza a visualização, armazenamento definitivo e processamento conforme os procedimentos descritos na seção de aquisição e análise.

Foi desenvolvida uma estrutura de encapsulamento destinada à proteção e organização dos elementos eletrônicos responsáveis pela aquisição e transmissão dos dados do sensor. Essa estrutura consiste em uma caixa do tipo patola, projetada para abrigar o sistema micro-

controlado baseado no Arduino Mega, bem como os circuitos de condicionamento de sinal e as conexões necessárias para comunicação com o computador e alimentação do sistema. O encapsulamento permite a acomodação adequada dos módulos eletrônicos, garantindo proteção mecânica, facilidade de instalação e acesso aos conectores durante a operação em campo. A Figura 5 apresenta a concepção do encapsulamento eletrônico do sistema embarcado, incluindo a modelagem tridimensional da caixa, a visualização explodida de seus componentes internos e a implementação real utilizada durante os testes experimentais.

Figura 5 – Sistema eletrônico embarcado acondicionado em caixa patola. (a) Representação tridimensional da caixa fechada contendo o sistema eletrônico; (b) vista explodida em modelo 3D evidenciando a disposição dos componentes internos, incluindo a placa de circuito impresso e os elementos de fixação; (c) fotografia do sistema implementado durante os testes experimentais em campo.



Fonte: Autor (2026).

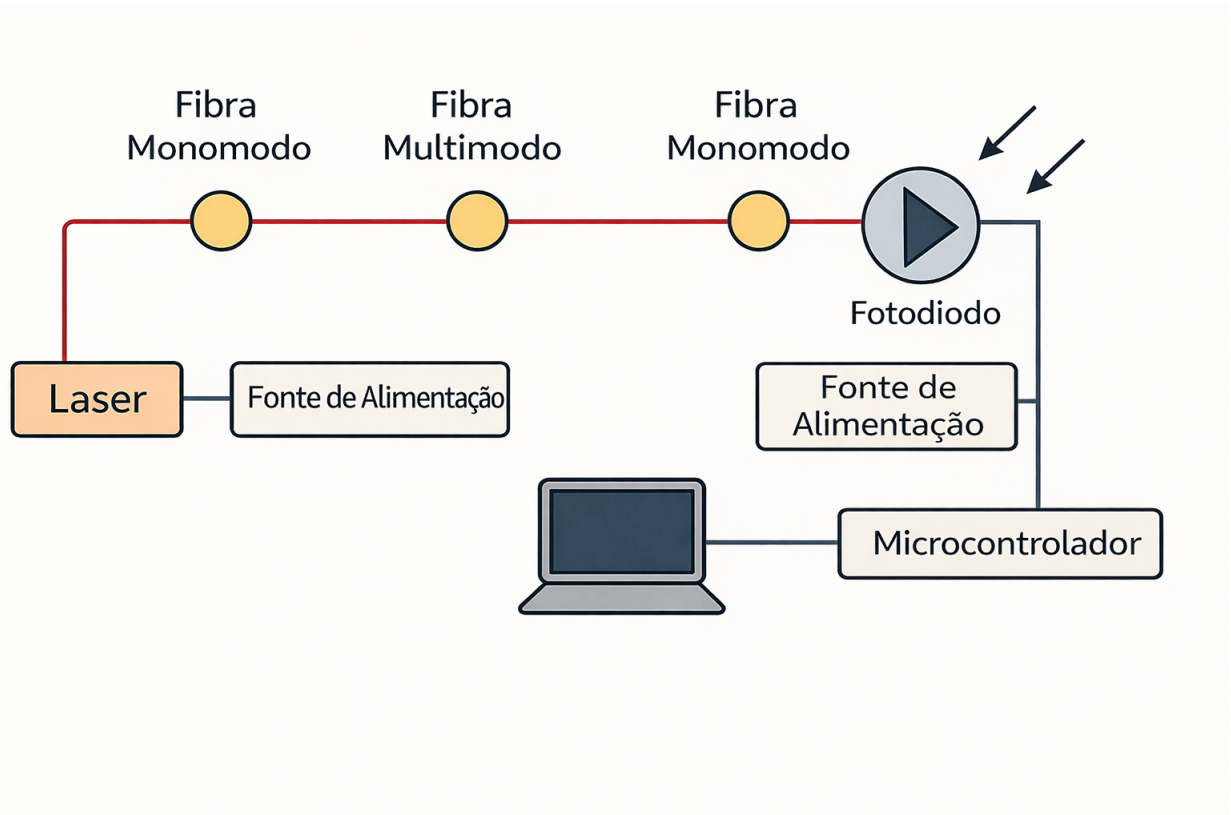
#### 4.1.4 *Setup experimental*

Os ensaios em ambiente relevante foram planejados com o sensor instalado no trilho e o enlace óptico implementado a partir de cabo *drop* (Intelbras, 2023). Em campanhas distintas, foram empregados comprimentos de aproximadamente 350 m e 650 m de cabo *drop*, composto por quatro fibras internas, das quais duas foram dedicadas à operação, transmissão e recepção, e duas reservadas.

A Figura 6 apresenta o diagrama esquemático do *setup* experimental utilizado para a realização dos testes do sensor óptico desenvolvido neste trabalho. O sistema é composto por uma fonte de luz laser responsável pela injeção do sinal óptico em uma fibra monomodo, que posteriormente é acoplada a um segmento de fibra multimodo, onde se encontra a região sensível

do sensor. Após a propagação pela estrutura óptica, o sinal luminoso é convertido em sinal elétrico por meio de um fotodiodo. O fotodetector é alimentado por uma fonte de alimentação dedicada e seu sinal é encaminhado para um sistema microcontrolado, implementado com Arduino, responsável pela aquisição dos dados. As informações adquiridas são então enviadas a um computador, onde são visualizadas e analisadas no ambiente MATLAB, permitindo o monitoramento, armazenamento e processamento dos sinais obtidos durante os experimentos (MathWorks, 2024).

Figura 6 – Representação da configuração experimental básica do sistema.





Fonte: Autor (2026).

No que se refere às partes óptica e eletrônica que compõem o sistema, bem como a integração das mesmas, a Tabela 3 apresenta dos componentes ópticos e optoeletrônicos utilizados para construção do laço óptico, além dos conectores e adaptadores necessários para montagem do laço.

Tabela 3 – Componentes utilizados no sistema.

<p><b>Laser diodo LSLDL 1550</b></p> <p><b>Descrição:</b> Laser indicado para aplicações industriais e laboratoriais. Este laser utiliza uma DFB Laser Diode com uma potência de saída de 4 mW e opera na faixa de comprimento de onda de 1550 nm, este laser é adequado para uma variedade de aplicações. Além disso, sua configuração inclui conectores FC e APC, garantindo uma conexão segura e estável com a fibra óptica (AliExpress, 2026c).</p>	
<p><b>Conector SC/UPC</b></p> <p><b>Descrição:</b> O <i>Fast Conector SC/UPC</i> reutilizável foi desenvolvido para ser utilizado em cabos <i>Drop Flat</i> de até 3 mm e/ou cordões ópticos de 2 a 3 mm. De fácil montagem, não exige nenhuma ferramenta especial, além do kit comum e comercial de conectorização de fibra óptica (Fibras Net SP, 2026).</p>	
<p><b>Adaptador FC/SC (macho/fêmea)</b></p> <p><b>Descrição:</b> Este conector pode ser utilizado na junção de fibras com diferentes conectores (macho FC/PC e fêmea SC/UPC). Devido ao conector da fibra monomodo ser SC/UPC macho e a entrada do fotodiodo ser uma conexão FC/UPC fêmea, se faz necessário o uso deste adaptador para conectar a fibra monomodo no sistema de leitura e conversão óptico-eletrônica (AliExpress, 2026b).</p>	

Continuação da Tabela 3

<p><b>Cabo <i>drop</i> de fibra monomodo</b></p> <p><b>Descrição:</b> Cabo do tipo <i>drop</i> contendo 4 fibras monomodo oir cabo e com núcleo de 8,2 <math>\mu\text{m}</math> para a transmissão e recepção do sinal. Esse tipo de cabo é frequentemente empregado em telecomunicações para distribuição de internet, o que facilita sua aquisição, com a certificação da ANATEL, devido à ampla disponibilidade em diversos tamanhos, especificações e fabricantes (Intelbras, 2023).</p>	
<p><b>Adaptador SC/SC (fêmea/fêmea)</b></p> <p><b>Descrição:</b> O adaptador óptico é utilizado para a junção de fibras ópticas ou cordões ópticos MM ou SM com conectores que sejam do tipo SC/UPC (AliExpress, 2026a).</p>	
<p><b>Adaptador FC/SC (fêmea/fêmea).</b></p> <p><b>Descrição:</b> Este adaptador já é responsável por juntar dois conectores machos que sejam FC/PC e o outro SC/UPC. O uso deste adaptador é necessário, pois o laser acoplado à fibra usa conexão macho FC/PC e a fibra monomodo do sensor tem conector macho SC/UPC (Orbita Digital, 2026).</p>	
<p><b>Fotodiodo FGA01FC</b></p> <p><b>Descrição:</b> É um fotodiodo de InGaAs da <i>Thorlabs</i> e cobre uma ampla faixa de comprimento de onda, de 800 nm a 1800 nm, além de possuir conexão FC (Thorlabs, 2017).</p>	
<p><b>Fibra Óptica Multimodo FG105LVA</b></p> <p><b>Descrição:</b> Fibra multimodo de 105 <math>\mu\text{m}</math> da <i>Thorlabs</i> encarregada de medir a vibração para detecção do VLT (Thorlabs, 2024a).</p>	

#### 4.1.5 *Montagem do sistema integrado e interface óptico-eletrônica*

O sistema completo foi integrado em uma estrutura de suporte contendo um carretel de cabo de fibra óptica monomodo, permitindo organização do enlace, redução de tensões mecânicas e maior praticidade de manutenção. A instrumentação de campo foi acondicionada em uma caixa de junção eletrônica robusta de plástico, posicionada na estrutura, conectada à fibra óptica externa por meio de dois cabos de fibra monomodo. Essa caixa inclui conectores ópticos, parafusos de vedação e interfaces externas destinadas à alimentação e à aquisição de dados.

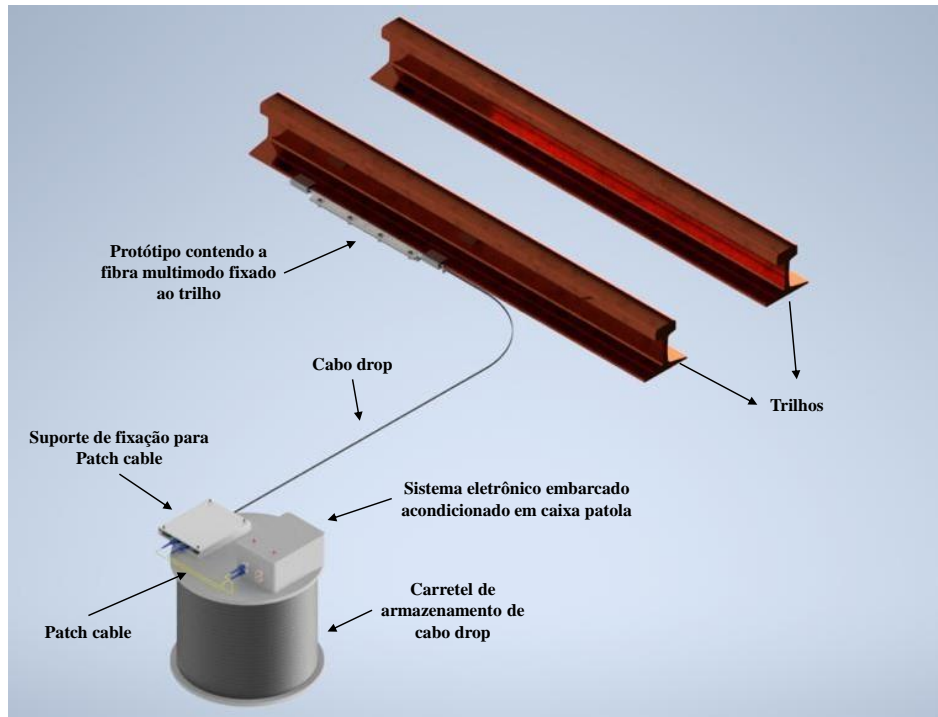
A montagem de campo considerou a logística de acondicionamento do enlace e do sistema de instrumentação, com organização do cabo em rolo/carretel, posicionamento do conjunto eletrônico em caixa apropriada e operação com computador portátil para acompanhamento da aquisição. O sistema embarcado foi conectado ao computador durante os testes para leitura e monitoramento do sinal do fotodetector.

Para a montagem do *setup* experimental do sensor SMS, as partes óptica, eletrônica e mecânica são integradas de forma modular, de modo a constituir um único sistema funcional apto aos ensaios em campo, conforme ilustra a Figura 7. Nessa arquitetura, a parte óptica estabelece o caminho de emissão, propagação e recepção do sinal luminoso no laço SMS, a parte mecânica garante a fixação e a proteção do trecho sensível no trilho (bem como a organização das conexões), e a parte eletrônica realiza o acionamento da fonte de luz, a conversão optoeletrônica e o condicionamento do sinal, além de automatizar a aquisição e a transmissão dos dados para o computador. Assim, o sensor final resulta da integração entre: emissão óptica por laser acoplado em fibra, modulação no trecho sensível (fibra multimodo instalada no suporte no trilho), detecção por fotodiodo e aquisição microcontrolada e comunicação com o *software* de processamento.

Como estratégia de operação e diagnóstico em campo, foram incorporados dois LEDs (*Light Emitting Diode*) vermelhos na superfície superior da caixa, atuando como indicadores visuais de eventos associados à detecção de trens. Adicionalmente, um compartimento adjacente foi utilizado como interface óptica passiva, abrigando as conexões responsáveis por ligar a fonte laser e o fotodetector, instalados na caixa eletrônica, à fibra óptica monomodo externa. Essa separação modular entre eletrônica e interface óptica contribuiu para preservar o alinhamento e a estabilidade das conexões, além de simplificar inspeções e substituições durante operação.

A arquitetura compacta e modular do conjunto favoreceu estabilidade mecânica, preservação das condições ópticas e manutenção do desempenho em ambiente real. A integração

Figura 7 – Visão geral do sistema de sensoriamento instalado no trilho: protótipo mecânico com a fibra multimodo fixada ao trilho, cabo *drop* monomodo interligando o sensor e caixa patola contendo o sistema eletrônico embarcado.



Fonte: Autor (2026).

com sistemas externos para aquisição e processamento foi realizada via MATLAB, permitindo implementação de rotinas de leitura, visualização e registro dos eventos. Como perspectiva de evolução do sistema, prevê-se a inclusão de módulos de comunicação sem fio e armazenamento em nuvem, visando futuras implantações em redes distribuídas de sensores.

#### 4.1.6 Sistema de aquisição e análise dos dados

A aquisição do sinal foi realizada por meio de um microcontrolador Arduino Mega, responsável por amostrar continuamente o sinal elétrico proveniente do fotodetector e transmitir os dados ao computador via interface USB. O ambiente de processamento e visualização adotado foi o MATLAB, no qual foram implementadas rotinas para leitura do fluxo de dados e atualização em tempo real da série temporal durante a aquisição.

No processamento, foi adotado um fluxo de detecção baseado em três etapas: cálculo da primeira derivada do sinal, visando evidenciar mudanças rápidas associadas a perturbações mecânicas, cálculo/monitoramento da energia do sinal e cálculo/monitoramento da variância. A decisão de detecção foi estabelecida por meio de limiares pré-definidos para energia e variância, configurados no algoritmo de aquisição e análise.

#### 4.1.7 Algoritmo de detecção adaptativa baseado em sinais para eventos de passagem de trens

A detecção da passagem de trens é realizada por meio de um algoritmo simples e adaptativo, baseado na análise estatística do sinal de vibração medido pelo sensor. O parâmetro central utilizado na cadeia de processamento é a variância do sinal, que reflete o nível de energia das vibrações medidas. Em condições normais de operação, quando não há trem presente, o sinal de vibração contém apenas ruído de fundo e oscilações mecânicas de baixa amplitude, resultando em um baixo nível de variância. No entanto, a passagem de um trem gera forte excitação mecânica na estrutura da via, aumentando significativamente a amplitude e a energia do sinal registrado. Essa mudança se manifesta estatisticamente como um aumento abrupto na variância do sinal, possibilitando a detecção confiável do evento.

##### 4.1.7.1 Variância como medida relacionada à energia

Seja  $x[n]$  o sinal de vibração em tempo discreto, adquirido continuamente no sensor. Para cada instante de tempo, o sinal é analisado dentro de uma janela deslizante de  $N$  amostras:

$$x[1], x[2], \dots, x[N]. \quad (4.1)$$

A variância das amostras na janela é calculada como:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x[n] - \mu)^2. \quad (4.2)$$

Quando o sinal tem média aproximadamente zero (ou é detendenciado),  $\sigma^2$ , a variância do sinal, torna-se proporcional à energia média do sinal, o que significa que vibrações de maior energia produzem valores de variância maiores e  $\mu$  representa a média dos valores. Portanto, o monitoramento da evolução temporal de  $\sigma^2$  fornece um indicador indireto, porém robusto, da intensidade da vibração.

##### 4.1.7.2 Estimativa Adaptativa do Ruído de Fundo

Para garantir robustez a mudanças lentas nas condições ambientais ou estruturais, o algoritmo mantém uma estimativa continuamente atualizada da variância de base associada ao nível de ruído. Esse nível de ruído de fundo, denotado por  $\sigma_{\text{base}}^2$ , é atualizado por meio de uma média móvel exponencial:

$$\sigma_{\text{base}}^2(k) = (1 - \alpha) \sigma_{\text{base}}^2(k - 1) + \alpha \sigma^2(k). \quad (4.3)$$

Onde  $\sigma^2(k)$  é a variância calculada para a  $k$ -ésima janela, e  $\alpha$  é um parâmetro de suavização que controla a velocidade de adaptação. É importante ressaltar que essa atualização é realizada somente quando nenhum evento é detectado, evitando que a linha de base seja enviesada para cima durante a passagem de trens.

#### 4.1.7.3 Lógica de Detecção de Eventos

O algoritmo classifica um evento de passagem de trem sempre que a variância instantânea exceder significativamente o nível de fundo adaptativo. Isso é expresso matematicamente pela condição de limiar:

$$\sigma^2(k) > \sigma_{\text{base}}^2(k) + \Delta. \quad (4.4)$$

Onde  $\Delta$  é uma margem de segurança fixa introduzida para minimizar detecções falsas devido a flutuações aleatórias ou perturbações transitórias.

Quando a desigualdade é satisfeita, o sistema sinaliza o início de um evento de passagem de trem. O evento permanece ativo enquanto a variância continuar a exceder o limiar adaptativo. Assim que a variância retornar a níveis comparáveis à variância de fundo, o algoritmo registra o fim do evento e retoma o monitoramento normal.

#### 4.1.7.4 Interpretação Prática e Vantagens do Método

Em termos físicos, a variância comporta-se como um indicador da energia de vibração. Em condições normais, esse valor permanece baixo e estável. À medida que um trem se aproxima e interage mecanicamente com os trilhos, a amplitude das vibrações medidas aumenta acentuadamente, levando a um aumento abrupto correspondente na variância. Essa divergência repentina da variância de fundo produz uma assinatura de detecção clara e confiável.

Esta estratégia de detecção caracteriza-se pela sua simplicidade computacional, uma vez que se baseia apenas em operações aritméticas básicas e, portanto, pode ser facilmente implementada em plataformas de *hardware* embarcadas; pela sua adaptabilidade, visto que o nível de ruído de referência é continuamente atualizado para compensar mudanças lentas nas

condições de operação, e pela sua robustez, porque a detecção baseia-se na energia estatística em vez da forma de onda, o que torna o método tolerante ao ruído e à variabilidade ambiental.

#### **4.1.8 Testes em laboratório: prova de conceito**

Com o objetivo de validar os componentes ópticos, mecânicos e eletrônicos do sensor de vibração baseado na configuração SMS, foram realizadas extensas atividades experimentais em ambiente de laboratório. Esses testes tiveram caráter predominantemente qualitativo e buscaram investigar diferentes configurações de montagem e acondicionamento da fibra multimodo sensora, avaliando aspectos relacionados à sensibilidade à vibração, estabilidade do sinal e níveis de ruído. Assim, os experimentos constituíram uma etapa de prova de conceito destinada a demonstrar a viabilidade do arranjo SMS como sensor de vibração e a identificar as condições mais adequadas de amortecimento, proteção e acomodação mecânica da fibra.

O princípio de funcionamento do sistema de sensoriamento baseia-se na estrutura de fibra óptica SMS. Nessa configuração, duas fibras monomodo, com diâmetro de núcleo de aproximadamente 8,2  $\mu\text{m}$ , foram utilizadas para transmissão e recepção do sinal óptico, enquanto a seção intermediária de fibra multimodo atuou como elemento sensível à vibração. Durante os testes laboratoriais foram avaliadas fibras multimodo com diferentes diâmetros de núcleo, incluindo 50  $\mu\text{m}$ , 105  $\mu\text{m}$  e 200  $\mu\text{m}$  (Thorlabs, 2024c; Thorlabs, 2024a; Thorlabs, 2024b). Os resultados experimentais confirmaram o comportamento esperado da arquitetura SMS: propagação predominante do modo fundamental nas fibras monomodo e elevada sensibilidade à interferência multimodal no segmento multimodo quando submetido a perturbações mecânicas externas. Esses resultados evidenciam a adequação dessa arquitetura para aplicações de sensoriamento de vibração, apresentando baixa perda intrínseca, boa repetibilidade e elevada responsividade às excitações mecânicas.

Para identificar sistematicamente a configuração óptica mais adequada, foram construídos diversos conjuntos SMS utilizando diferentes combinações de fibras, fontes ópticas e métodos de interconexão. Dois tipos principais de acoplamento foram investigados: conexões por meio de fibras conectorizadas e conexões por emenda por fusão. Entre as conexões conectorizadas, foram avaliados conectores e adaptadores do tipo SC/UPC, FC/PC e SC/SC (Fibras Net SP, 2026; AliExpress, 2026b; Orbita Digital, 2026). A compatibilidade entre conectores, a qualidade do alinhamento óptico e a eficiência do acoplamento foram verificadas experimentalmente, comprovando que a conexão conectorizada apresentou menores perdas por inserção se

comparada à fusão, isso porque a fusão entre fibra ópticas de diâmetros muito diferentes, como é o caso da fibra monomodo em relação a multimodo, costumam apresentar altas perdas devido ao desalinhamento do núcleo e a diferença de distribuição de modo. Os adaptadores ópticos comerciais apresentaram bom desempenho, proporcionando interconexões de baixa perda e adequada estabilidade mecânica. Para a transmissão óptica ao longo do sistema, foram utilizados cabos *drop* monomodo certificados pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), garantindo a integridade da transmissão em longas distâncias. Entre as fibras multimodo avaliadas, a fibra com diâmetro de núcleo de 105  $\mu\text{m}$  apresentou comportamento modal estável e conformidade com as especificações de raio de curvatura durante as etapas de manuseio e montagem do sensor.

A fonte óptica utilizada nos experimentos foi um diodo laser acoplado a fibra óptica operando em comprimento de onda de 1550 nm, selecionado devido à sua estabilidade de emissão e à sua relação custo-benefício favorável (AliExpress, 2026c). Nesse arranjo, o sinal óptico é injetado na fibra monomodo de entrada e propagado até o segmento de fibra multimodo, onde ocorre a excitação de múltiplos modos guiados. A interferência entre esses modos torna o sistema sensível a perturbações mecânicas aplicadas à fibra multimodo. Durante os testes laboratoriais, a fibra multimodo foi posicionada sobre suportes de material esponjoso, que permitiam a aplicação de vibrações mecânicas controladas, reduzindo restrições mecânicas indesejadas nas extremidades da fibra. O dispositivo gerador de vibração foi colocado em contato com a região sensora, permitindo a excitação mecânica da estrutura.

A extremidade de saída da estrutura SMS foi conectada a uma segunda fibra monomodo, responsável por conduzir o sinal óptico modulado até o fotodetector. O fotodiodo converte as variações de intensidade óptica induzidas pelas vibrações mecânicas em um sinal elétrico. Esse sinal foi condicionado por uma placa eletrônica de aquisição dedicada e monitorado em tempo real por meio de um osciloscópio, permitindo a visualização direta da resposta temporal do sensor. A fonte laser foi alimentada por uma fonte de alimentação externa estabilizada, garantindo a estabilidade da potência óptica durante os experimentos. Essa configuração experimental, abordada em seções anteriores, possibilitou a avaliação sistemática da resposta do sensor sob excitações mecânicas controladas, bem como a análise da estabilidade do sinal, dos níveis de ruído e da sensibilidade associada ao fenômeno de interferência multimodal.

Também foram avaliadas diferentes estratégias de alimentação da fonte óptica, incluindo um circuito inicial baseado em divisor de tensão e um sistema de controle de corrente

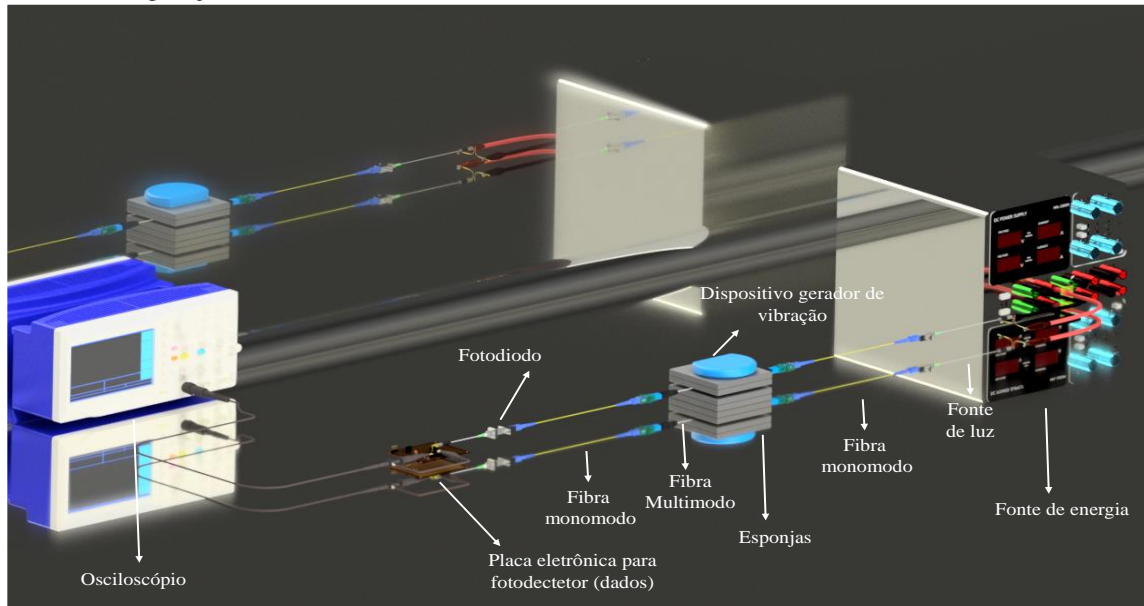
regulado. Ambas as abordagens apresentaram desempenho satisfatório e operação segura durante os testes laboratoriais do protótipo.

No que se refere à etapa de detecção óptica, diferentes unidades de fotodetectores foram caracterizadas em laboratório, incluindo uma alternativa de menor custo. Todos os dispositivos avaliados apresentaram responsividade adequada na faixa espectral de 850 nm a 1650 nm e produziram sinais elétricos com baixo nível de ruído, compatíveis com a eletrônica de aquisição utilizada no sistema, de modo que optou-se por utilizar no protótipo final o fotodiodo FGA01FC devido ao seu custo-benefício (Thorlabs, 2017).

A metodologia de avaliação experimental consistiu, inicialmente, na conexão da fonte óptica a uma extremidade do arranjo SMS, assegurando o correto alinhamento e minimização das perdas de acoplamento. Em seguida, a extremidade oposta do arranjo foi conectada ao fotodetector. Durante os experimentos, a fonte laser forneceu iluminação contínua e estável, enquanto o fotodiodo converteu as variações de intensidade óptica em sinais elétricos, que foram visualizados no osciloscópio ou registrados pelo sistema de aquisição de dados. Esse procedimento permitiu avaliar diretamente a eficiência de acoplamento, os níveis de ruído intrínseco, a estabilidade da potência óptica e a sensibilidade do sensor a perturbações mecânicas externas.

A Figura 8 apresenta o *setup* experimental de bancada utilizado para a caracterização do sensor óptico de vibração baseado na configuração SMS. O arranjo é composto por duas fibras monomodo interligadas por uma seção de fibra multimodo, que atua como elemento sensor. A luz é injetada na estrutura por uma fonte óptica acoplada à fibra de entrada, enquanto a vibração é aplicada à região sensora por meio de um dispositivo mecânico. Na saída do sistema, o sinal óptico modulado é convertido em sinal elétrico por um fotodiodo, condicionado por uma placa eletrônica e monitorado em um osciloscópio, permitindo a análise qualitativa da resposta do sensor às excitações mecânicas em ambiente de laboratório.

Figura 8 – Configuração experimental de bancada utilizada para validar a prova de conceito da detecção de vibração usando uma configuração de fibra SMS.



Fonte: Autor (2026).

Para a validação do comportamento óptico do sistema, foram realizados experimentos de vibração controlada utilizando um gerador de vibração portátil de baixa frequência, com intensidade ajustável. Nessa etapa, foram investigados três cenários distintos de excitação mecânica da fibra sensora que são discutidos a seguir.

#### 4.1.8.1 *Ensaio com aplicação direta de vibração sobre a fibra multimodo sensora*

No primeiro ensaio, o dispositivo gerador de vibração foi colocado em contato direto com o segmento de fibra multimodo, sem a utilização de elementos intermediários de amortecimento ou suporte mecânico, conforme ilustrado na Figura 9(a). O objetivo dessa configuração foi observar a resposta da estrutura SMS sob excitação mecânica direta, de modo a verificar sua sensibilidade intrínseca às vibrações aplicadas.

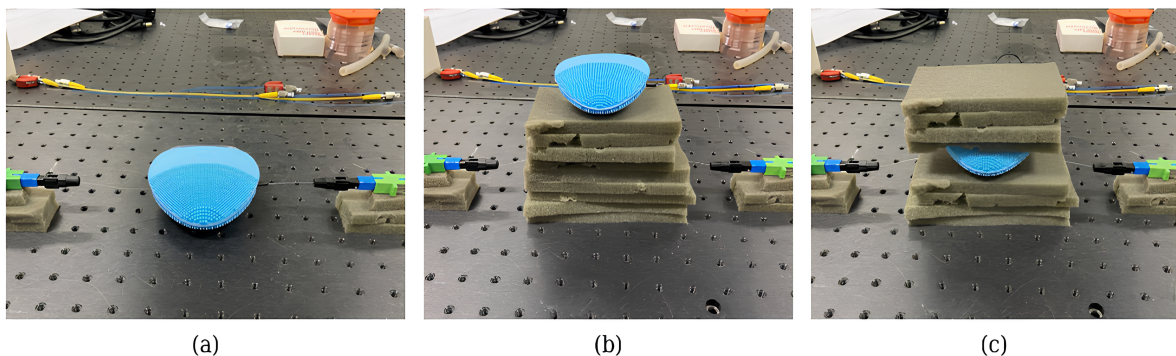
#### 4.1.8.2 *Ensaio com camadas de esponja posicionadas sobre a fibra sensora*

No segundo ensaio, foram adicionadas sucessivas camadas de material esponjoso sobre a fibra multimodo sensora, com o objetivo de investigar a influência do amortecimento mecânico superior sobre a resposta do sensor, como ilustrado na Figura 9(b). Nessa etapa, buscou-se avaliar como a inserção de uma proteção mecânica acima da fibra afetaria simultaneamente a sensibilidade à vibração e a estabilidade do sinal medido.

#### 4.1.8.3 Ensaio com camadas de esponja posicionadas acima e abaixo da fibra sensora

No terceiro ensaio, foram posicionadas camadas de material esponjoso tanto acima quanto abaixo da fibra multimodo sensora, utilizando-se a mesma quantidade em ambos os lados, com cinco camadas superiores e cinco inferiores, conforme apresentado na Figura 9(c). Essa configuração foi proposta com o objetivo de proporcionar um suporte mecânico mais simétrico à fibra, permitindo avaliar se tal arranjo favoreceria simultaneamente a estabilidade do sinal e a manutenção da sensibilidade à vibração.

Figura 9 – Configurações experimentais adotadas nos ensaios de laboratório para investigação da influência do amortecimento e da acomodação mecânica da fibra multimodo sobre a resposta do sensor SMS: (a) aplicação direta de vibração sobre a fibra sensora, sem elementos de amortecimento ou proteção mecânica; (b) configuração com camadas de esponja posicionadas apenas sobre a fibra, utilizada para avaliar o efeito do amortecimento superior na atenuação do sinal; e (c) configuração com camadas de esponja posicionadas acima e abaixo da fibra, proporcionando suporte mecânico simétrico e melhor compromisso entre estabilidade e sensibilidade do sinal detectado.



Fonte: Autor (2026).

A campanha experimental em laboratório culminou em uma análise comparativa das diferentes configurações avaliadas, considerando parâmetros como sensibilidade do sensor, estabilidade do sinal, níveis de potência óptica e custo dos componentes. Adicionalmente, foi realizada a validação do sistema de aquisição embarcado baseado em Arduino Mega, confirmando sua capacidade de registrar de forma confiável as variações temporais do sinal provenientes do fotodetector e transmiti-las ao ambiente MATLAB para visualização em tempo real.

#### 4.1.9 Testes de campo supervisionados

Após a validação inicial do sensor em ambiente controlado de laboratório, foram realizados testes de campo supervisionados com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema em condições reais de operação ferroviária. Esses experimentos foram conduzidos em uma linha funcional de VLT, operada por autoridades locais, proporcionando um ambiente realista para a

validação do sensor óptico de vibração baseado na configuração SMS. A realização dos testes em campo permitiu verificar a capacidade do sistema de detectar vibrações induzidas pela passagem de veículos ferroviários e avaliar aspectos relacionados à robustez mecânica, estabilidade do sinal e confiabilidade da cadeia de aquisição de dados.

Durante a campanha experimental, o sensor foi instalado diretamente no trilho utilizando o suporte mecânico previamente desenvolvido, sendo fixado por meio de grampos metálicos de forma a garantir adequado acoplamento mecânico entre o trilho e a fibra sensora. O roteamento da fibra óptica foi cuidadosamente organizado para minimizar tensões mecânicas e preservar a integridade do enlace óptico ao longo da instalação. A estrutura de sensoriamento consistia em uma configuração de fibra óptica monomodo–multimodo–monomodo, na qual uma seção de fibra multimodo com aproximadamente 30 cm de comprimento e diâmetro de núcleo de 105  $\mu\text{m}$  foi inserida entre fibras monomodo padrão com diâmetro de núcleo de 8,2  $\mu\text{m}$ . O enlace de fibra monomodo entre a cabeça sensora instalada no trilho e a unidade de aquisição de dados apresentava comprimento aproximado de 650 m, demonstrando a capacidade do sistema de detectar vibrações do trilho a essa distância e validando, portanto, um alcance mínimo operacional de 650 m.

O sinal óptico na saída da estrutura SMS foi detectado por um fotodiodo, responsável pela conversão das flutuações de intensidade óptica em sinais elétricos. Esses sinais foram enviados para um microcontrolador Arduino Mega, que realizou a aquisição dos dados e sua transmissão em tempo real para um computador, onde foram visualizados e analisados no ambiente MATLAB. A interface desenvolvida em MATLAB permitiu acompanhar a evolução temporal do sinal e identificar claramente os eventos associados à passagem dos veículos ferroviários. Embora pequenas atenuações tenham sido observadas devido ao manuseio dos cabos e às condições de instalação em campo, o sistema manteve potência óptica e sensibilidade suficientes para detectar as variações de sinal induzidas pelas vibrações do trilho. Os níveis de tensão registrados na entrada do Arduino permaneceram tipicamente abaixo de 500 mV, porém as modulações associadas às vibrações geradas pela passagem dos trens foram claramente distinguíveis do nível de ruído de fundo, confirmando a viabilidade operacional do sistema.

Durante os testes de campo, foi desenvolvido e aplicado um algoritmo simples de detecção baseado na análise estatística do sinal adquirido, explicado na Seção 3.1.1. O parâmetro central utilizado foi a variância do sinal, diretamente relacionada à energia associada às vibrações detectadas. A passagem do trem provoca um aumento significativo na variabilidade do sinal

óptico, que se manifesta como um aumento abrupto da variância do sinal elétrico correspondente. Para explorar esse comportamento, foi implementado um algoritmo baseado em análise por janela deslizante, no qual a variância do sinal é continuamente calculada dentro de um conjunto fixo de amostras. A cada nova amostra adquirida, o ponto mais antigo é descartado, mantendo a janela de análise constantemente atualizada. Quando a diferença entre a variância instantânea e um valor médio de referência excede um limiar proporcional previamente definido, o sistema identifica a ocorrência da passagem de um trem.

Um aspecto relevante observado experimentalmente foi que o nível médio do sinal não permanece constante ao longo do tempo, podendo apresentar variações naturais mesmo na ausência de eventos. Além disso, após a passagem do trem, o sinal nem sempre retorna exatamente ao valor médio inicial, possivelmente devido a pequenas deformações mecânicas, microcurvaturas na fibra ou rearranjos nos conectores ópticos. Por esse motivo, o algoritmo foi desenvolvido de forma a não depender de um limiar absoluto fixo. Em vez disso, a estratégia adotada considera apenas a variação estatística do sinal, tornando o método robusto a deriva de nível e a pequenas variações do sinal de fundo.

O algoritmo foi inicialmente desenvolvido e validado em ambiente MATLAB, permitindo a análise detalhada do comportamento do sinal e o ajuste dos parâmetros de detecção. Após essa etapa de validação, a lógica do algoritmo foi implementada no microcontrolador Arduino, possibilitando o processamento em tempo real e a sinalização direta da detecção por meio de interfaces homem-máquina, como LEDs ou *displays*. Conceitualmente, o método de detecção apresenta analogia com técnicas clássicas de detecção de atividade de voz (*Voice Activity Detection* – VAD), amplamente utilizadas em sistemas de comunicação, nas quais eventos relevantes são identificados a partir de aumentos significativos na variância do sinal em relação ao ruído de fundo.

Para validar o funcionamento do sensor óptico em diferentes condições operacionais, foram realizados testes com três tipos distintos de veículos ferroviários: um VLT em linha de operação, um trem de carga e um trem de manutenção. Esses experimentos tiveram como objetivo avaliar a capacidade do sistema de detectar vibrações geradas por veículos com diferentes massas e características dinâmicas, bem como verificar a robustez e a estabilidade do sensor em um ambiente ferroviário real. Os resultados obtidos para cada tipo de veículo são apresentados e discutidos na Seção 5.

#### 4.1.9.1 Testes de campo com VLT em linha de operação

Os primeiros experimentos em campo foram realizados em uma linha operacional de VLT, com o objetivo de avaliar o desempenho do sensor óptico em condições reais de operação ferroviária. Durante esses testes, o sensor baseado na configuração SMS foi instalado diretamente no trilho utilizando o suporte mecânico desenvolvido, garantindo o adequado acoplamento mecânico entre a fibra sensora e a estrutura do trilho. O roteamento da fibra óptica foi cuidadosamente realizado para evitar tensões excessivas e preservar a integridade do enlace óptico.

Durante os ensaios realizados, foi possível registrar o momento de aproximação do veículo à região monitorada pelo sensor. A Figura 10 apresenta o VLT aproximando-se da região de detecção durante os testes de campo. Nesse instante, o sensor óptico fixado ao trilho, por meio de seu cabo de conexão, transmitia o sinal ao sistema embarcado instalado a bordo, permitindo a visualização e o acompanhamento em tempo real da resposta do sensor durante a passagem do trem.

Figura 10 – Veículo leve sobre trilhos aproximando-se da área de detecção.



Fonte: Autor (2026).

A coleta de dados ocorreu durante múltiplas passagens do VLT ao longo da via monitorada. O sinal óptico modulado pela vibração do trilho foi detectado por um fotodiodo e convertido em sinal elétrico, sendo posteriormente adquirido por um microcontrolador Arduino Mega e transmitido em tempo real para o ambiente MATLAB. A interface desenvolvida permitiu

acompanhar a evolução temporal do sinal e identificar claramente os eventos associados à passagem do veículo.

Durante as passagens do VLT, foram observadas assinaturas de sinal características associadas às vibrações induzidas pelo deslocamento do veículo sobre o trilho. Essas perturbações manifestaram-se como aumentos significativos na variabilidade do sinal elétrico detectado, permitindo distinguir claramente os eventos de passagem em relação ao nível de ruído de fundo. Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade do sensor óptico proposto para a detecção de vibrações geradas por veículos leves sobre trilhos em condições reais de operação.

#### *4.1.9.2 Testes de campo com trem de carga*

Além dos experimentos realizados com o VLT, foram conduzidos testes adicionais utilizando um trem de carga, com o objetivo de avaliar o comportamento do sensor diante de veículos ferroviários com maior massa e diferentes características dinâmicas. O trem utilizado durante os experimentos era composto por três seções principais: uma locomotiva com aproximadamente 80 toneladas, seguida por dois vagões de carga com massas de 20 toneladas cada. Assim como no VLT, sensor foi conectado ao sistema de aquisição de dados por meio de um cabo *drop*, proporcionando uma ligação confiável e flexível entre a fibra óptica montada no trilho e a unidade de processamento eletrônico, conforme mostrado na Figura 11 .

Figura 11 – Trem de carga utilizado nos testes de campo controlados, composto por uma locomotiva e dois vagões de carga com diferentes características de massa.



Fonte: Autor (2026).

Durante esta campanha experimental, o trem foi operado em duas velocidades distintas, 5 km/h e 15 km/h, mantendo-se a mesma carga transportada. Essas condições operacionais foram escolhidas para avaliar a resposta do sensor em diferentes regimes de velocidade, representativos de cenários típicos de operação ferroviária em áreas de manobra ou cruzamentos.

Na configuração experimental adotada, três laços ópticos foram instalados ao longo da linha férrea. Dois desses laços estavam conectados a um circuito de aquisição dedicado, projetado para simular o funcionamento de um sistema de detecção para acionamento de cancelas ferroviárias. Quando a presença do trem era detectada pelo sistema, indicadores visuais baseados em LEDs eram ativados, permanecendo acesos durante a passagem do veículo e sendo desligados após sua saída da região monitorada.

Os resultados obtidos demonstraram que as vibrações induzidas pela passagem do trem de carga geraram variações significativas no sinal detectado, permitindo a identificação clara dos eventos de passagem e são apresentados e discutidos no Capítulo 5 desta tese. Além disso, foi possível observar diferenças nas características do sinal associadas às distintas massas das seções do trem, evidenciando o potencial do sistema para aplicações futuras envolvendo análise de assinaturas de vibração ferroviária.

#### 4.1.9.3 Testes de campo com trem de manutenção

Com o objetivo de avaliar o comportamento do sensor diante de veículos ferroviários mais leves, também foi realizado um experimento utilizando um trem de manutenção. Esse tipo de veículo apresenta massa significativamente menor quando comparado ao trem de carga e ao VLT, o que possibilitou investigar a sensibilidade do sistema de sensoriamento em condições de vibração de menor intensidade.

Nos testes realizados, foram utilizados os mesmos laços ópticos SMS e a mesma configuração de aquisição de dados empregada nos experimentos com o trem de carga, garantindo a consistência das condições de medição. O sensor permaneceu instalado no trilho utilizando o mesmo suporte mecânico e o mesmo sistema de roteamento da fibra óptica adotado nos testes anteriores. O trem de manutenção está devidamente representado na Figura 12.

Figura 12 – Trem de manutenção utilizado nos testes de campo controlados. A fibra sensora foi montada diretamente no trilho utilizando um suporte específico, permitindo a aquisição de sinais de vibração gerados por um veículo ferroviário mais leve.



Fonte: Autor (2026).

Durante a passagem do trem de manutenção, foram registradas variações no sinal óptico associadas às vibrações induzidas no trilho, embora com amplitudes menores em comparação às observadas nos testes com o trem de carga. Ainda assim, as perturbações foram suficientemente detectáveis pelo sistema de aquisição, permitindo identificar claramente o evento

de passagem do veículo.

A comparação entre os sinais obtidos para o trem de manutenção, o trem de carga e o VLT permitiu avaliar o comportamento do sensor diante de diferentes condições dinâmicas e massas veiculares. Os resultados indicam que o sensor óptico proposto apresenta robustez suficiente para detectar vibrações associadas a diferentes tipos de veículos ferroviários, evidenciando seu potencial para aplicações em sistemas de monitoramento e detecção em infraestrutura ferroviária.

#### **4.2 Construção do sensor de peso em movimento baseado em grades de Bragg em fibra**

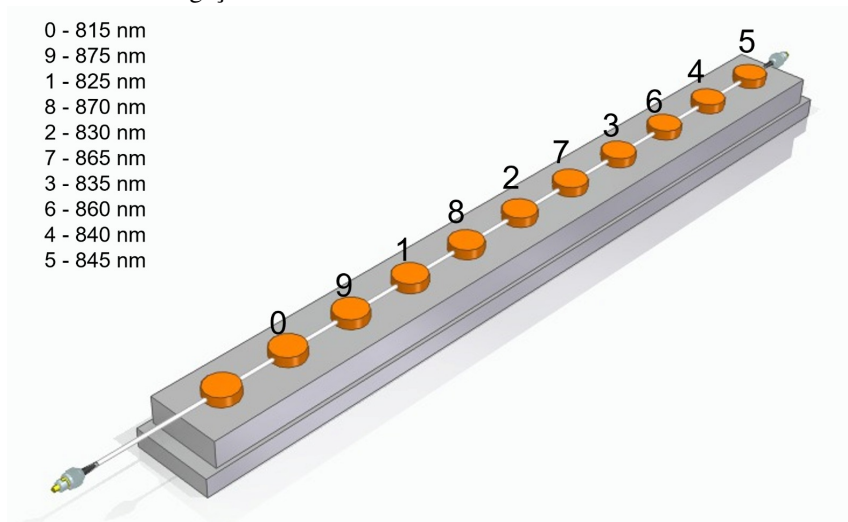
Esta vertente metodológica descreve as etapas empregadas para o desenvolvimento, integração e validação de um sistema de pesagem em movimento baseado em FBG. O planejamento experimental foi estruturado de forma progressiva, partindo de ensaios controlados em laboratório e avançando para avaliações em ambiente relevante, de modo a reduzir incertezas, estabelecer parâmetros operacionais e assegurar repetibilidade antes da implantação em campo. Assim, a metodologia foi organizada em três frentes complementares: testes estáticos em laboratório com máquina universal de ensaios, destinados à caracterização do comportamento da estrutura instrumentada sob carregamentos controlados, testes específicos com borrachas de silicone, empregados como elementos de amortecimento e acoplamento mecânico, visando padronizar o material e o procedimento de moldagem/curagem para uso no protótipo e testes de campo supervisionados, concebidos para avaliar o sistema em condições de passagem veicular e infraestrutura compatível com a aplicação final.

O sistema de medição utiliza uma fibra óptica instrumentada com múltiplas FBGs e interrogada por equipamento dedicado, um interrogador óptico, permitindo aquisição contínua do deslocamento espectral associado à deformação mecânica. A estrutura de pesagem foi concebida para operar sob solicitações elevadas, demandando integração entre elementos mecânicos, materiais de interface (amortecimento) e instrumentação óptica, além de protocolos de instalação e segurança compatíveis com ensaios dinâmicos. Dessa forma, as subseções a seguir detalham os procedimentos adotados em cada etapa, incluindo preparação das amostras, configurações de ensaio, instrumentação e critérios de execução, sem abordar resultados ou desempenho obtido.

### 4.2.1 Setup experimental

O *Setup* experimental do sistema de pesagem em movimento baseado em FBG foi concebido de forma a integrar, em um único arranjo, a instrumentação óptica (interrogação e leitura das grades), a estrutura mecânica de suporte e amortecimento (responsável pelo acoplamento carga–sensor) e uma fonte externa de aplicação de pressão/peso (responsável por excitar mecanicamente o protótipo). A Figura 13 apresenta a modelagem 3D da base do protótipo contendo as grades, bem como a identificação do comprimento de onda de cada grade, é importante ressaltar que apesar de 11 borrachas, o sensor é formado por 10 FBGs, de modo que a primeira borracha está posinada não para proteger FBG ou amortecer o impactado da carga, mas para equilibrar o sistema (FiSens GmbH, 2022b).

Figura 13 – Protótipo com FBGs para pesagem em movimento: disposição dos pontos de sensoriamento ao longo da estrutura mecânica (alumínio 6061) e identificação das FBGs por canal e respectivos comprimentos de onda centrais (nm) utilizados na interrogação.

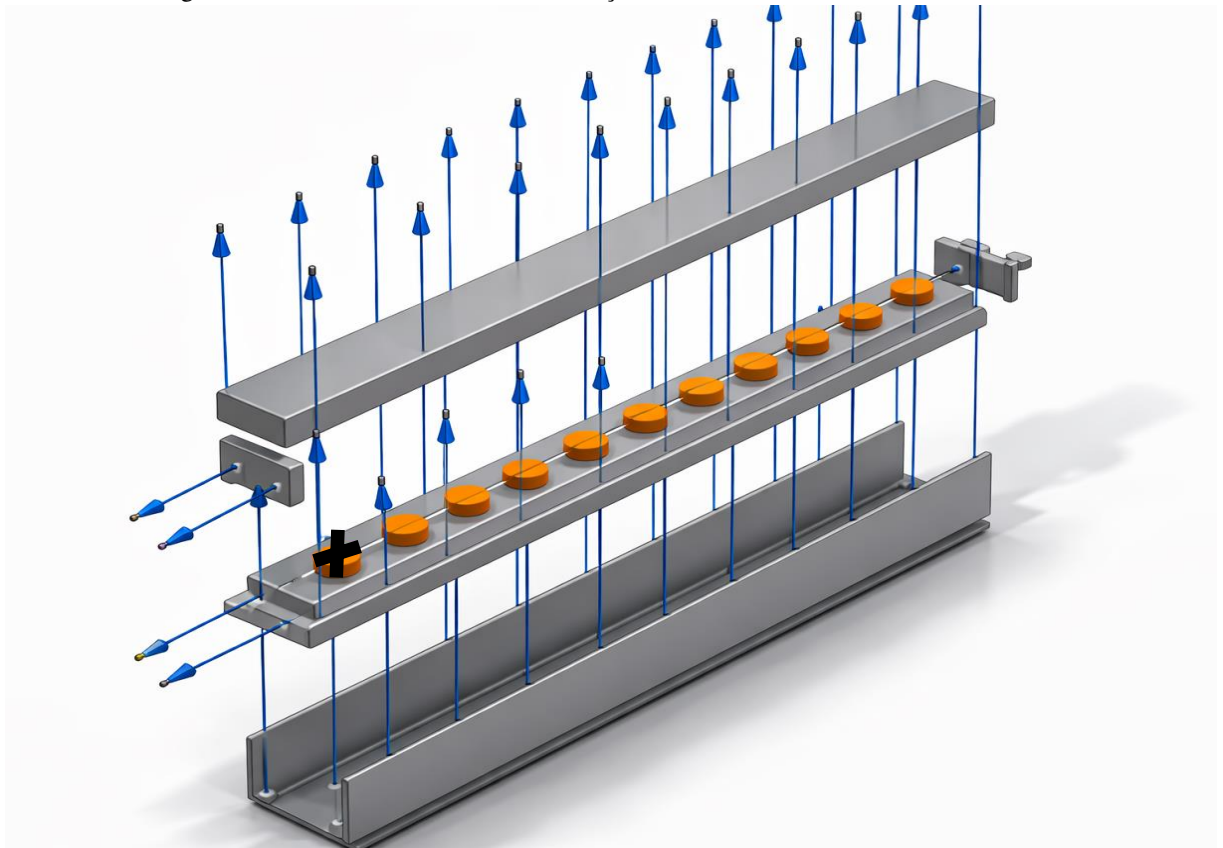


Fonte: Autor (2026).

A instrumentação óptica é composta por um interrogador da marca *FiSens*, conectado a uma fibra óptica que contém as FBGs, as quais foram empregadas foram customizadas para este projeto e especificadas de modo a serem compatíveis com a faixa de operação do interrogador (FiSens GmbH, 2022c). O interrogador é fornecido com *software* integrado para análise e monitoramento (*BraggSens*), utilizado para a configuração dos canais, identificação das grades e visualização do deslocamento espectral associado às solicitações mecânicas (FiSens GmbH, 2022a). A comunicação entre interrogador e computador é realizada via interface USB, sendo o próprio interrogador responsável por emitir a luz de interrogação e captar o sinal refletido pelas FBGs, que é então apresentado e registrado no *BraggSens*.

A estrutura mecânica do protótipo foi confeccionada em liga de alumínio 6061, na qual as FBGs são posicionadas em pontos discretos ao longo do comprimento do protótipo e cada ponto de instrumentação ou sensoriamento possui amortecimento individual por meio de borracha de silicone *shore 55*, fabricada e curada em laboratório, com a finalidade de padronizar o acoplamento mecânico, reduzir concentrações locais de tensão e proteger a fibra durante a aplicação de carga (Redelease, 2026). Dessa forma, o conjunto estrutura–amortecimento–FBG constitui o elemento sensível que responde às ações externas de pressão/peso impostas ao protótipo, por exemplo, por máquina universal de ensaios ou por carregamentos supervisionados em campo. A Figura 14 apresenta a modelagem 3D em vista explodida do conjunto, destacando a organização dos componentes estruturais e a forma de integração das FBGs ao corpo mecânico. Observa-se a fibra óptica com as grades posicionadas ao longo da barra sensora, cada uma com amortecimento/encapsulamento individual em silicone, bem como as partes superiores e inferiores de suporte e os elementos de fixação que mantêm o alinhamento do sistema durante a aplicação de carga.

Figura 14 – Vista explodida do protótipo mecânico instrumentado com FBG para pesagem em movimento: estrutura em alumínio (6061), pontos de sensoriamento encapsulados em borracha de silicone e percurso da fibra óptica, evidenciando a montagem em camadas e os elementos de fixação.



Para fins de rastreabilidade e correta associação entre as posições mecânicas e os canais do interrogador, as FBGs foram organizadas com comprimentos de onda centrais distintos, permitindo a leitura multiplexada em um único enlace óptico. No protótipo, as grades foram especificadas com comprimentos de onda centrais em 815 nm, 875 nm, 825 nm, 870 nm, 830 nm, 865 nm, 835 nm, 860 nm, 840 nm e 845 nm, conforme a identificação apresentada na Figura 13. Essa identificação também define o mapeamento entre a numeração física dos pontos instrumentados na estrutura mecânica e os índices/canais utilizados no ambiente de leitura do interrogador *FiSens*, garantindo consistência na aquisição e no processamento dos sinais ao longo de todas as etapas experimentais.

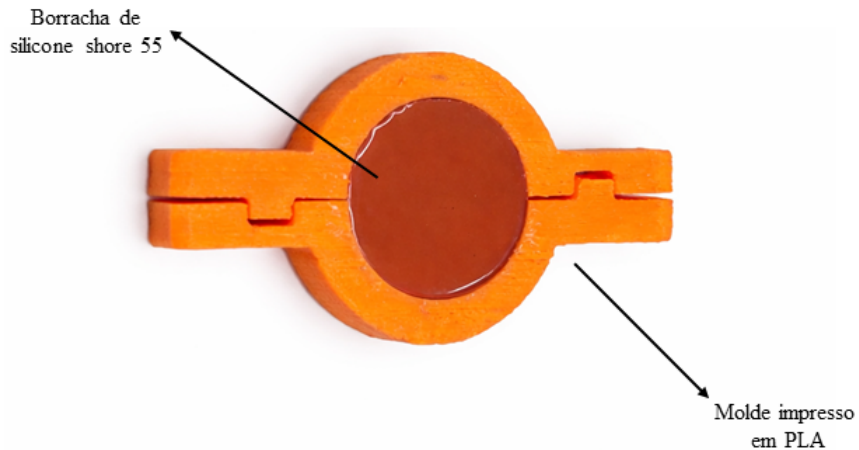
Em síntese, o *Setup* experimental é constituído por: interrogador *FiSens* conectado à fibra óptica instrumentada com FBGs customizadas, estrutura mecânica em alumínio 6061 de 3 m de comprimento com alocação das grades e amortecimento individual por borracha de silicone *shore 55*, fonte externa de aplicação de pressão/peso e computador com o *software BraggSens*, responsável pela supervisão, visualização em tempo real e registro dos dados adquiridos via USB.

#### **4.2.2 Testes com borrachas de silicone para amortecimento**

Antes de iniciar os testes estáticos do protótipo, foram executados ensaios específicos para seleção e padronização das borrachas de silicone utilizadas como elemento de amortecimento e acoplamento mecânico das FBGs. O objetivo metodológico dessa etapa foi avaliar a resistência mecânica das borrachas sob compressão e caracterizar o comportamento do arranjo borracha/sensor, incluindo análises de histerese em ciclos de compressão e descompressão, visando também identificar a opção mais durável e resistente a esforços repetitivos, sem comprometer a sensibilidade das grades.

As amostras de borracha foram moldadas em geometria compatível com a estrutura mecânica do protótipo por meio de um molde modelado e impresso em PLA, utilizado durante o processo de cura e devidamente ilustrado na Figura 15. Após a cura, as dimensões foram verificadas por medição, com referência de diâmetro de  $26 \pm 1$  mm e altura de  $10 \pm 0,6$  mm.

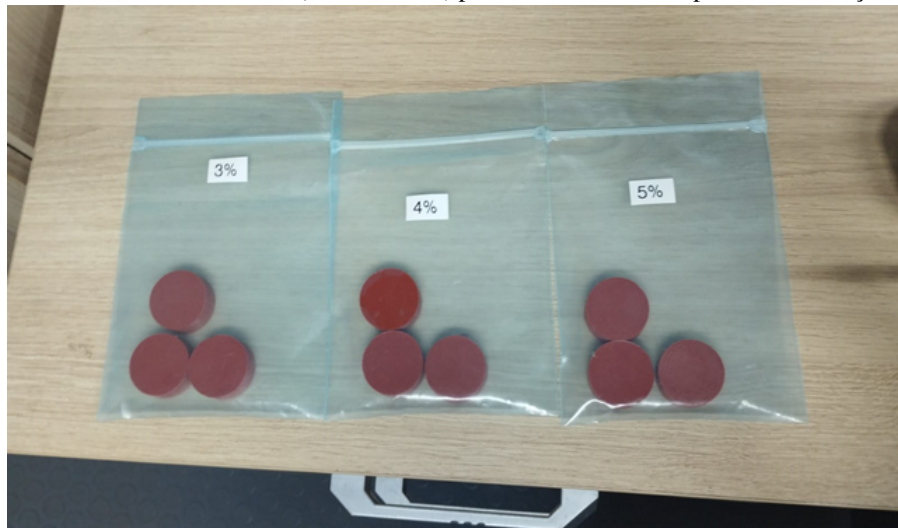
Figura 15 – Molde para fabricação das borrachas de silicone (shore 55).



Fonte: Autor (2026).

Foi adotada borracha de silicone shore 55 (bicomponente), variando-se a concentração de catalisador em massa para análise comparativa. A proporção recomendada do fabricante é 5%, porém, nos ensaios laboratoriais, foram produzidas amostras com concentrações de 3% a 5% (3%, 4%, 5%), com duas amostras por concentração. A cura foi realizada em laboratório, à temperatura ambiente, com período entre 24 e 48 horas, conforme a concentração utilizada e a Figura 16 mostra um registro dessas amostras.

Figura 16 – Amostras de borracha de silicone (shore 55) produzidas com diferentes proporções de catalisador: exemplares acondicionados e identificados (3%, 4% e 5%) para os ensaios de compressão e avaliação de durabilidade.



Fonte: Autor (2026).

Os ensaios mecânicos foram executados na EMIC DL-30000, posicionando-se a amostra no centro do prato fixo para receber a compressão do prato móvel acoplado à célula

de carga (EMIC Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda., 2003). O protocolo incluiu: ensaio de compressão com incremento controlado de carga em passos de 10 kgf até um esforço máximo predeterminado, buscando a identificação de regime de saturação mecânica e ensaio de compressão e descompressão com rampa de velocidade definida, repouso de 5 s no patamar máximo e retorno na mesma velocidade, permitindo avaliação do comportamento cíclico e da histerese. Em ambos os testes, a velocidade de compressão foi fixada em 20 mm/min

#### **4.2.3 Testes estáticos em laboratório com máquina universal**

A etapa de testes estáticos em laboratório teve como finalidade caracterizar o comportamento do protótipo de pesagem com FBGs sob carregamento controlado, em condições reprodutíveis. Para isso, foi utilizada uma máquina universal de ensaios EMIC DL-30000 (série 23), capaz de aplicar esforços de compressão elevados, com controle por *software* e leitura em tempo real da carga por célula de carga.

A estrutura de pesagem foi posicionada na máquina de forma que o prato de compressão atuasse no ponto de interesse do protótipo, inicialmente, a aplicação de carga foi realizada com o prato centralizado na região entre duas FBGs adjacentes, referenciadas no *software* de leitura, mantendo-se a estrutura devidamente apoiada e alinhada. Em seguida, quando necessário, foram considerados reposicionamentos do ponto de aplicação, com o objetivo de manter a continuidade dos ensaios em regiões operacionais do protótipo.

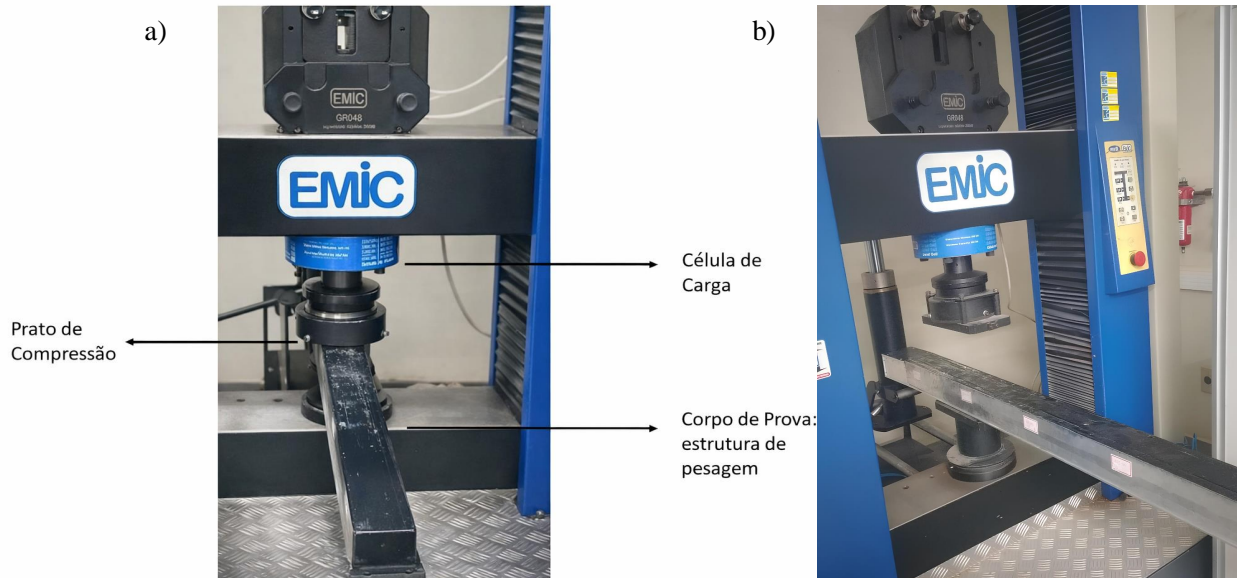
A operação da EMIC foi conduzida conforme recomendações de preparação e controle por *software* recomendados pelo fabricante da máquina e do *software*, logo foi utilizado um computador com o TESC EMIC instalado, energização e preparação da máquina para testes, definição dos fins de curso para delimitar o curso útil do ensaio, posicionamento do protótipo para teste e, posteriormente, programação do método de ensaio em compressão com definição de perfil de carga e velocidade de compressão.

O *script* de compressão foi configurado para aplicação de cargas sucessivas e pré-definidas, incluindo uma sequência de 500 kgf a 2250 kgf em incrementos de 250 kgf, com taxa de aplicação de 50 kgf/s. Em cada ensaio, a carga e a posição foram zeradas no início do procedimento para definição do referencial.

A Figura 17 apresenta um registro do arranjo utilizado nos ensaios estáticos com a máquina universal, evidenciando os principais componentes do sistema de carregamento, como célula de carga e prato de compressão, e o posicionamento do corpo de prova correspon-

dente à estrutura instrumentada de pesagem. Esse *setup* permite aplicar esforços controlados em compressão, assegurando alinhamento e repetibilidade durante as etapas de calibração e caracterização do protótipo.

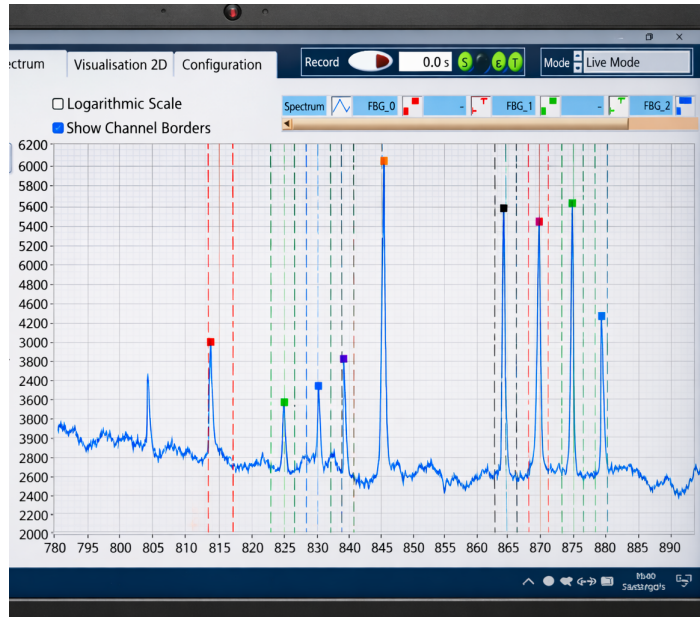
Figura 17 – Registro dos ensaios estáticos em laboratório na máquina universal de ensaios EMIC: (a) detalhe do conjunto de compressão com a célula de carga e o prato de compressão atuando sobre o corpo de prova (estrutura de pesagem); (b) visão geral do posicionamento do corpo de prova na máquina durante a aplicação de carga.



Fonte: Autor (2026).

A aquisição do sinal óptico foi realizada por interrogador óptico *FiSens*, com monitoramento via *software FiSens BraggSens 1.89*, cuja interface com os picos de cada grade é apresentada na Figura 18 e a interface durante a aquisição em modo de operação é apresentada na Figura 19, evidenciando a visualização simultânea dos canais correspondentes às FBGs e os recursos de registro e acompanhamento do sinal em tempo real (FiSens GmbH, 2022a). A estrutura instrumentada é composta por uma fibra óptica contendo 10 FBGs, protegidas por borrachas e conectadas ao interrogador por conexão FC/PC. O interrogador emite sinal óptico de banda larga e realiza a detecção dos sinais refletidos pelas FBGs e os dados são visualizados via comunicação serial no *BraggSens*, permitindo registrar e exportar as grandezas associadas ao deslocamento do comprimento de onda (e/ou deformação) ao longo do tempo e da carga aplicada.

Figura 18 – Interface do *software BraggSens 1.89* com espectro de reflexão das grades de Bragg, destacando os picos espectrais associados aos canais monitorados.



Fonte: Autor (2026).

Figura 19 – Interface do *software BraggSens 1.89* durante a aplicação de carga nos ensaios estáticos em laboratório, mostrando a variação temporal da deformação registrada por sensores de rede de Bragg.



Fonte: Autor (2026).

#### 4.2.4 Testes de campo estáticos e supervisionados

Os testes estáticos supervisionados em campo foram realizados nas instalações da Universidade Federal do Ceará (UFC), em ambiente controlado e com suporte operacional para execução segura das atividades experimentais. Nessa etapa, empregaram-se três veículos pesados, com massas distintas de 4890 kg (*Iveco Daily* com baú, da linha *Daily Chassi-Cabine/Furgão* de

carga), 3500 kg (*Volkswagen Worker 8.120*, adaptado com plataforma de reboque) e 4090 kg (*Volkswagen Worker 6.160*), ilustrados na Figura 20.

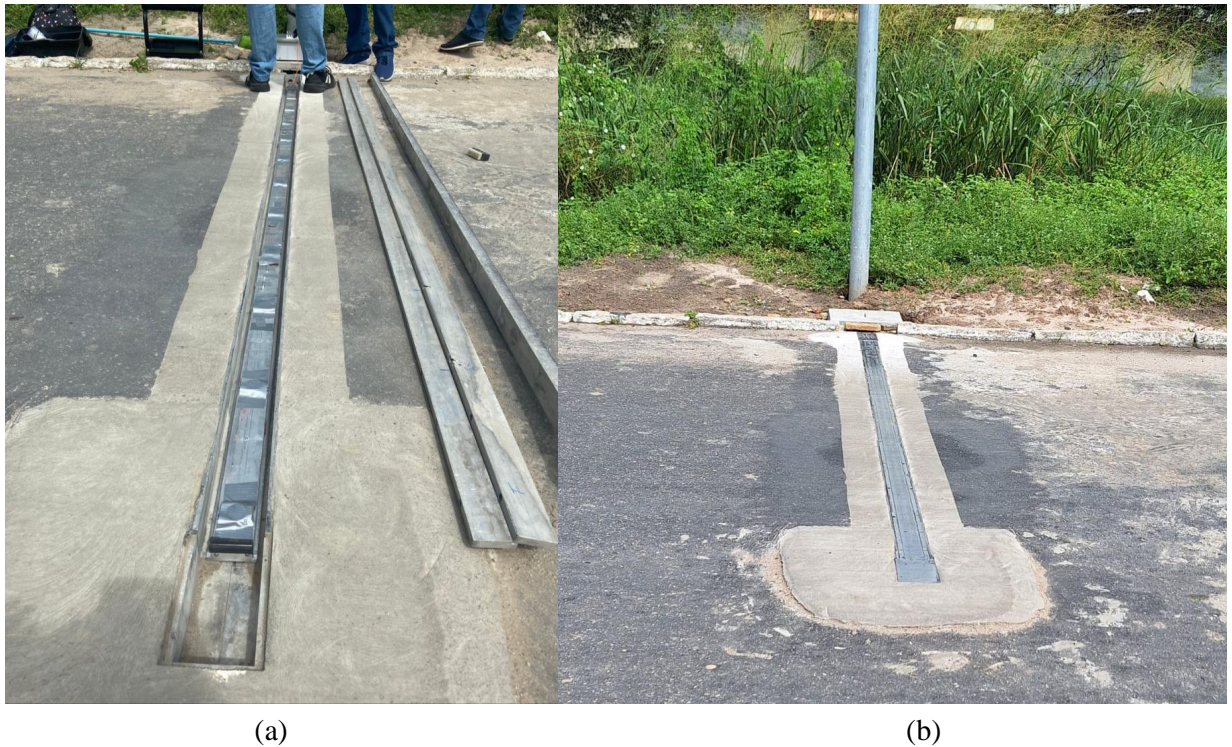
Figura 20 – Veículos utilizados nos testes estáticos supervisionados em campo: (a) *Volkswagen Worker 8.120* adaptado com plataforma de reboque (3500 kg); (b) *Volkswagen Worker 6.160* (4090 kg); (c) *Iveco Daily* com baú, da linha *Daily Chassi-Cabine/Furgão de carga* (4890 kg).



Fonte: Autor (2026).

Para a realização dos ensaios, foi estabelecida a necessidade de um trecho asfaltado mínimo de 100 m, livre de obstáculos, a fim de garantir distância e segurança para a manobra de aceleração e frenagem conforme o porte do veículo. A metodologia de implantação do protótipo em campo inclui a execução de um corte no pavimento para posicionamento da estrutura sob a manta asfáltica com dimensões aproximadas de 3,6 m por 0,15 m para acomodação correta da estrutura. Conforme ilustrado na Figura 21, o procedimento de instalação inicia-se com a abertura do rasgo longitudinal no pavimento, permitindo o encaixe e o alinhamento do corpo de prova ao longo do eixo de passagem do veículo. Na sequência, após o posicionamento da estrutura de pesagem no interior do corte, realiza-se o nivelamento e a recomposição do entorno com material de preenchimento, de modo a manter a superfície transitável e assegurar a transferência de carga para a estrutura instrumentada durante as passagens supervisionadas.

Figura 21 – Implantação do protótipo de pesagem em campo: (a) etapa de instalação, com a estrutura posicionada no corte longitudinal executado no pavimento; (b) protótipo após a instalação.



Fonte: Autor (2026).

Os testes estáticos em campo supervisionados foram planejados de modo que a estrutura de medição permanecesse sem recobrimento asfáltico, devendo ficar nivelada com a superfície do trecho para permitir melhor absorção mecânica das cargas, reduzindo risco de saturação.

Adicionalmente, foram estabelecidas condições operacionais e de apoio para a execução supervisionada: disponibilidade de energia elétrica e local coberto para acondicionamento de equipamentos e equipe, logística de transporte da estrutura até o local de testes, equipe e materiais para obra civil (corte da pista, fixação no solo e nivelamento) e adequação dos veículos quanto à largura máxima de eixo de 2,10 m, garantindo a passagem simultânea dos pneus do eixo sobre a região de medição.

Durante esta campanha, diferentemente da campanha com os veículos leves, devido a rupturas no percurso óptico que continha as redes de Bragg, a instrumentação ficou limitada à FBG 0, com comprimento de onda central de 815 nm. Essa FBG estava posicionada na extremidade direita do berço que abriga as grades, próxima ao meio-fio da calçada, o que demandou cuidados adicionais de alinhamento. Assim, para padronizar a aplicação da carga estática sobre o ponto sensível, a posição da FBG 0 foi previamente indicada no solo por

marcação, e a equipe realizou o alinhamento manual do pneu do veículo com essa referência antes de cada aquisição, buscando manter a roda centrada sobre o ponto de medição.

A aquisição dos dados foi conduzida por meio do *software BraggSens (FiSens)*, utilizado para monitoramento e registro do sinal das FBGs. Como parte do procedimento metodológico, foram avaliados dois tempos de integração distintos (15 ms e 100 ms), com o objetivo de comparar o comportamento das leituras sob diferentes configurações de coleta.

Como apenas uma grade estava operacional, o protocolo de testes foi estruturado para contemplar múltiplas condições de carregamento do veículo sobre o mesmo ponto sensível. Dessa forma, para cada veículo, as medições foram realizadas considerando ambos os lados (esquerdo e direito), bem como a atuação das rodas dianteiras e traseiras. Além disso, foram executadas manobras com o veículo avançando de frente e em marcha ré, mantendo a condição de carga fixa no instante de leitura, de modo a registrar a resposta da FBG 0 sob diferentes orientações e distribuições de carga sobre o ponto instrumentado.

#### **4.2.5 Testes dinâmicos de fluxo livre**

Os testes dinâmicos em fluxo livre foram realizados em condições reais de tráfego, sem controle direto da velocidade dos veículos, com o objetivo de avaliar o sistema de pesagem em movimento em cenário representativo de operação. Nessa etapa, múltiplos veículos atravessaram o berço instrumentado em regime de circulação normal, e a coleta foi conduzida de forma contínua, registrando simultaneamente os sinais das FBGs e as imagens obtidas por câmeras para posterior identificação dos eventos. O procedimento metodológico foi estruturado da seguinte forma:

- **Aquisição contínua e registro dos eventos:** o interrogador óptico permaneceu em aquisição contínua durante o período de ensaio. Para cada evento de passagem, buscou-se garantir a captura dos dois eixos do veículo por meio do registro dos picos no sinal e a confirmação visual pela câmera. Adotou-se como critério de seleção apenas os veículos para os quais foi possível obter, concomitantemente, a assinatura dos dois eixos nos sensores e o registro por imagem.
- **Configuração de amostragem no cenário dinâmico:** no modo de fluxo livre, o sistema foi configurado para coletar amostras em intervalos fixos de tempo, adotando-se a configuração de captura de um dado a cada 100 ms, visando compatibilizar a coleta com a dinâmica de passagem dos eixos.

- **Dados coletados por evento:** para cada passagem selecionada, foram extraídos: o tempo de passagem de cada eixo, o intervalo de tempo entre eixos, séries temporais de *strain* de cada FBG monitorada durante o evento. Paralelamente, a identificação do veículo (modelo/ano) e a obtenção de informações complementares (por exemplo, distância entre eixos e massa de referência) foram realizadas a partir de dados tabelados associados.
- **Estimativa da velocidade média no fluxo livre:** a velocidade média do veículo foi determinada a partir do tempo entre eixos obtido pelo sistema e da distância entre eixos do veículo (informação tabelada), permitindo a caracterização do regime de passagem no cenário de tráfego real.

Com o objetivo de documentar os ensaios dinâmicos de fluxo livre, a Figura 22 apresenta o registro de alguns dos veículos leves utilizados na etapa experimental, os quais foram empregados na validação do sistema de pesagem em cenário real de tráfego.

Figura 22 – Veículos leves registrados nos ensaios dinâmicos do sistema de pesagem baseado em FBG: (a) Volkswagen Up; (b) Toyota Yaris Sedan.



Fonte: Autor (2026).

#### 4.2.6 Modelagem e análise dos dados do sistema de pesagem com FBG

Com o objetivo de estabelecer uma relação quantitativa entre a resposta óptica do protótipo instrumentado com FBGs e a carga mecânica aplicada durante os ensaios estáticos em laboratório, foi adotada uma abordagem de modelagem multivariada baseada em dados experimentais. A estratégia empregada buscou explorar, de forma conjunta, a contribuição de

múltiplos pontos de sensoriamento distribuídos ao longo da estrutura mecânica, uma vez que a resposta global do protótipo não depende exclusivamente da deformação local medida por uma única FBG, mas do comportamento mecânico combinado da estrutura sob compressão.

Os dados utilizados na modelagem foram obtidos a partir dos registros brutos exportados pelo *software BraggSens*, associado ao interrogador óptico *FiSens*. Durante os ensaios de compressão realizados na máquina universal EMIC DL-30000, foram adquiridas séries temporais correspondentes ao deslocamento espectral das FBGs instrumentadas na barra sensora, em diferentes níveis de carga. Esses dados brutos constituíram a base para a etapa de processamento e calibração do sistema.

Embora a estrutura sensora possuísse dez FBGs multiplexadas em um único enlace óptico, a modelagem final foi construída a partir de quatro sensores selecionados, identificados como  $FBG_0$ ,  $FBG_6$ ,  $FBG_3$  e  $FBG_8$ . A seleção desses canais decorreu da sua maior relevância para a estimação da carga, considerando-se a resposta experimental observada ao longo dos ensaios. Dessa forma, o modelo passou a utilizar, como variáveis de entrada, os sinais correspondentes a esses quatro pontos de sensoriamento.

A abordagem adotada consistiu em um modelo polinomial multissensorial de segunda ordem, associado à regressão Ridge. Essa estratégia permitiu não apenas considerar os termos lineares associados às respostas individuais das FBGs, mas também incorporar termos quadráticos e termos de interação cruzada entre sensores. Tal formulação é particularmente adequada para sistemas mecânicos instrumentados distribuídos, nos quais a resposta estrutural pode apresentar comportamento não estritamente linear e dependência combinada entre diferentes regiões de deformação.

Assim, a carga estimada pelo modelo foi representada a partir de uma combinação entre: os termos lineares das quatro FBGs selecionadas, os termos quadráticos de cada uma dessas variáveis e os termos de interação entre pares de sensores. Em termos conceituais, essa estrutura de modelagem permite capturar tanto a influência individual de cada ponto instrumentado quanto os efeitos conjuntos entre regiões distintas da barra sensora submetida ao carregamento.

Antes do ajuste do modelo, as variáveis de entrada foram submetidas a uma etapa de padronização estatística, com o objetivo de tornar comparáveis as escalas numéricas dos diferentes termos empregados na regressão. Para isso, cada variável foi normalizada com base em sua média e em sua escala de dispersão, conforme a Equação 4.5:

$$z_i = \frac{x_i - \mu_i}{s_i}. \quad (4.5)$$

Em que  $x_i$  representa o valor bruto da variável de entrada,  $\mu_i$  corresponde à média calculada para essa variável no conjunto de calibração,  $s_i$  representa o fator de escala associado e  $z_i$  corresponde ao valor padronizado utilizado na regressão.

Após a etapa de normalização, foi ajustado um modelo de regressão Ridge, cuja formulação incorpora um termo de regularização para reduzir a sensibilidade do ajuste a correlações entre as variáveis explicativas e minimizar problemas de sobreajuste. Esse procedimento é especialmente importante em modelos polinomiais com múltiplos termos, nos quais a expansão das variáveis pode aumentar significativamente a dimensionalidade do problema. A expressão geral da carga estimada pelo modelo pode ser representada conforme a Equação 4.6:

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j z_j. \quad (4.6)$$

Em que  $\hat{y}$  é a carga estimada,  $\beta_0$  é o termo independente do modelo,  $\beta_j$  são os coeficientes ajustados e  $z_j$  representam as variáveis padronizadas, incluindo os termos lineares, quadráticos e de interação entre os sensores.

No presente estudo, o modelo final foi configurado com expansão polinomial de segunda ordem, utilizando os sinais das quatro FBGs selecionadas como base para a geração das variáveis derivadas. Dessa forma, o conjunto de entrada passou a contemplar os seguintes termos:  $FBG_0$ ,  $FBG_6$ ,  $FBG_3$  e  $FBG_8$ , bem como os produtos cruzados entre pares de sensores. Essa formulação resultou em um modelo multivariado capaz de estimar a carga a partir da resposta conjunta da estrutura instrumentada.

A base experimental utilizada no processo de calibração foi composta por leituras individuais obtidas durante os ensaios de compressão, totalizando milhares de amostras associadas aos diferentes níveis de carga aplicados. Adicionalmente, os resultados foram também organizados por patamares de carga, permitindo a obtenção de valores médios e a construção da curva de calibração do sistema. Para aumentar a robustez estatística da resposta e reduzir a influência de ruídos e flutuações instantâneas do interrogador, adotou-se o uso da mediana de múltiplas leituras em janelas amostrais, conforme procedimento implementado na planilha de análise.

A avaliação do desempenho do modelo foi realizada por meio de métricas estatísticas aplicadas à etapa de calibração e à validação. Entre os indicadores empregados, destacam-se o coeficiente de determinação  $R^2$ , o erro absoluto médio e o erro percentual médio. O coeficiente de determinação foi utilizado para quantificar a capacidade explicativa do modelo em relação à variação da carga experimental, enquanto os erros absolutos e percentuais permitiram avaliar a precisão prática da estimativa em unidades de carga e em termos relativos.

Os resultados da modelagem evidenciaram que a abordagem multissensorial de segunda ordem foi adequada para representar a resposta do protótipo de pesagem óptica na faixa de operação investigada. A utilização combinada de múltiplas FBGs mostrou-se mais representativa do comportamento estrutural do sistema do que uma abordagem baseada em sensor único, uma vez que o carregamento mecânico aplicado à estrutura gera um campo de deformações distribuído ao longo da barra. Nesse contexto, o emprego de interações entre sensores permitiu capturar efeitos mecânicos acoplados e melhorar a capacidade preditiva do modelo.

Portanto, o procedimento de análise de dados adotado neste trabalho pode ser compreendido como uma etapa de calibração matemática do sistema de pesagem, na qual os sinais ópticos brutos medidos pelas FBGs foram convertidos em estimativas de carga por meio de um modelo de regressão polinomial multivariado com regularização. Tal abordagem confere maior robustez à interpretação dos dados experimentais e estabelece uma base quantitativa para a utilização do protótipo como sistema fotônico de pesagem em movimento.

## 5 RESULTADOS

A seção de resultados desta tese está organizada em duas vertentes, em consonância com a abordagem metodológica apresentada no Capítulo 4. Na primeira vertente, são apresentados e discutidos os resultados obtidos com o sensor óptico em configuração SMS, desenvolvido para detecção de trens por meio da aferição de vibrações no trilho. Na segunda vertente, são apresentados e discutidos os resultados relativos ao sistema de pesagem em movimento baseado em FBG, incluindo as análises conduzidas conforme os procedimentos experimentais e critérios de aquisição e processamento descritos no referido capítulo.

### 5.1 Sensor de fibra óptica SMS para detecção de trens: resultados e discussões

#### 5.1.1 Testes em laboratório: prova de conceito

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos testes laboratoriais de prova de conceito, realizados com o objetivo de validar a metodologia proposta para a utilização do sensor SMS na medição de vibrações. Conforme descrito no Capítulo 4, esses experimentos foram organizados em três configurações distintas, definidas de acordo com a forma de amortecimento empregada na região da fibra multimodo sensora. A primeira configuração consistiu na aplicação direta da vibração sobre a fibra multimodo, a segunda envolveu a utilização de múltiplas camadas de esponja posicionadas sobre a fibra sensora e a terceira foi estabelecida com a inserção de camadas de esponja tanto acima quanto abaixo da fibra sensora. Essa divisão experimental permitiu avaliar a influência das diferentes condições de amortecimento sobre a resposta do sensor, contribuindo para uma análise mais abrangente do seu comportamento em ambiente controlado.

##### 5.1.1.1 Ensaio com aplicação direta de vibração sobre a fibra multimodo sensora

O objetivo dessa configuração consistiu em analisar a resposta da estrutura SMS quando submetida à excitação mecânica direta, a fim de verificar sua sensibilidade intrínseca às vibrações aplicadas, conforme o cenário apresentado na seção 4.1.8.1. Os resultados mostraram flutuações intensas e rápidas no sinal detectado, evidenciando elevada sensibilidade do sensor às perturbações mecânicas, como observado na Figura 23(a). A resposta obtida confirmou que a fibra multimodo atua efetivamente como região sensora do arranjo SMS, apresentando variações

ópticas perceptíveis quando submetida à vibração. Entretanto, também foi observada significativa instabilidade temporal do sinal, associada ao contato direto do gerador com a fibra e à ausência de qualquer estrutura de suporte ou amortecimento.

Esse comportamento indica que, embora a aplicação direta da vibração maximize a resposta óptica do sistema, também intensifica os efeitos de ruído e compromete a repetibilidade do sinal. Assim, concluiu-se que essa configuração apresenta alta responsividade, porém baixa estabilidade para uma detecção confiável em aplicações práticas, sendo necessária a introdução de mecanismos de acomodação mecânica nas etapas subsequentes.

#### *5.1.1.2 Ensaio com camadas de esponja posicionadas sobre a fibra sensora*

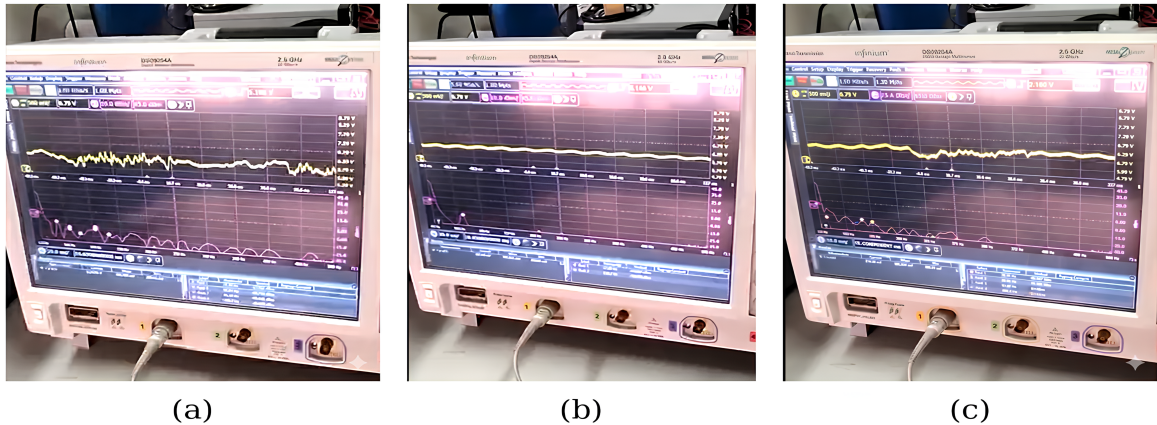
Nesta etapa, conforme o cenário apresentado na seção 4.1.8.1, verificou-se que o aumento gradual do número de camadas de esponja, chegando a até dez camadas, provocou atenuação progressiva da resposta vibracional observada na Figura 23(b). As medições obtidas por meio do osciloscópio evidenciaram redução da amplitude do sinal detectado à medida que o número de camadas aumentava. Esse resultado demonstrou que o material esponjoso absorve parte significativa da energia mecânica incidente antes que ela atinja efetivamente a fibra multimodo.

Embora essa configuração tenha proporcionado maior estabilidade temporal e menores níveis de ruído, também resultou em sensível diminuição da capacidade de detecção de pequenas vibrações. Dessa forma, concluiu-se que a utilização de esponja apenas sobre a fibra favorece a estabilidade do sistema, porém em detrimento da sensibilidade, não representando a condição mais equilibrada entre proteção mecânica e resposta do sensor.

#### *5.1.1.3 Ensaio com camadas de esponja posicionadas acima e abaixo da fibra sensora*

Para este cenário, apresentado na seção 4.1.8.1, os resultados obtidos mostraram que essa disposição produziu maior variação de tensão detectada em comparação com a configuração em que a esponja foi aplicada apenas na parte superior da fibra apresentada na Figura 23(c). Esse comportamento sugere que o amortecimento simétrico melhora o acoplamento mecânico entre a fonte de vibração e a fibra multimodo, favorecendo a transferência de energia mecânica para a região sensora. Além disso, observou-se melhora significativa na estabilidade temporal do sinal, com menor ocorrência de flutuações abruptas e resposta mais uniforme ao longo do tempo.

Figura 23 – Resposta elétrica do fotodiodo obtida durante os ensaios de vibração da fibra multimodo em diferentes condições de acomodação mecânica: (a) aplicação direta de vibração sobre a fibra sensora, sem elementos de amortecimento, produzindo elevada variação de amplitude e maior instabilidade temporal do sinal; (b) aplicação de vibração com camadas de esponja posicionadas apenas sobre a fibra, resultando em maior amortecimento mecânico, redução da amplitude do sinal e menor sensibilidade; e (c) aplicação de vibração com camadas de esponja posicionadas acima e abaixo da fibra, proporcionando suporte mecânico simétrico, resposta mais estável e melhor equilíbrio entre sensibilidade e estabilidade do sinal detectado.



Fonte: Autor (2026).

Esse resultado indica que o suporte mecânico promovido pelas camadas de esponja em ambos os lados da fibra contribui para reduzir microcurvaturas aleatórias e deslocamentos indesejados, tornando a resposta do sensor mais previsível e repetível. Assim, entre as configurações avaliadas, essa condição apresentou o melhor compromisso entre sensibilidade e estabilidade, sendo considerada a mais adequada para a continuidade do desenvolvimento do protótipo.

Em todos os experimentos realizados, o gerador de vibração foi aplicado diretamente sobre a camada externa de esponja, e a intensidade da vibração foi progressivamente aumentada e reduzida para avaliar o comportamento dinâmico da estrutura SMS. Os resultados demonstraram que apenas a seção de fibra multimodo respondeu às excitações mecânicas aplicadas, enquanto as fibras monomodo permaneceram praticamente insensíveis às vibrações externas, conforme esperado teoricamente.

A campanha experimental em laboratório culminou em uma análise comparativa das diferentes configurações avaliadas, considerando parâmetros como sensibilidade do sensor, estabilidade do sinal, níveis de potência óptica e custo dos componentes. Adicionalmente, foi realizada a validação do sistema de aquisição embarcado baseado em Arduino Mega, confirmando sua capacidade de registrar de forma confiável as variações temporais do sinal provenientes do fotodetector e transmiti-las ao ambiente MATLAB para visualização em tempo real.

De modo geral, os resultados obtidos nos testes de laboratório estabeleceram uma

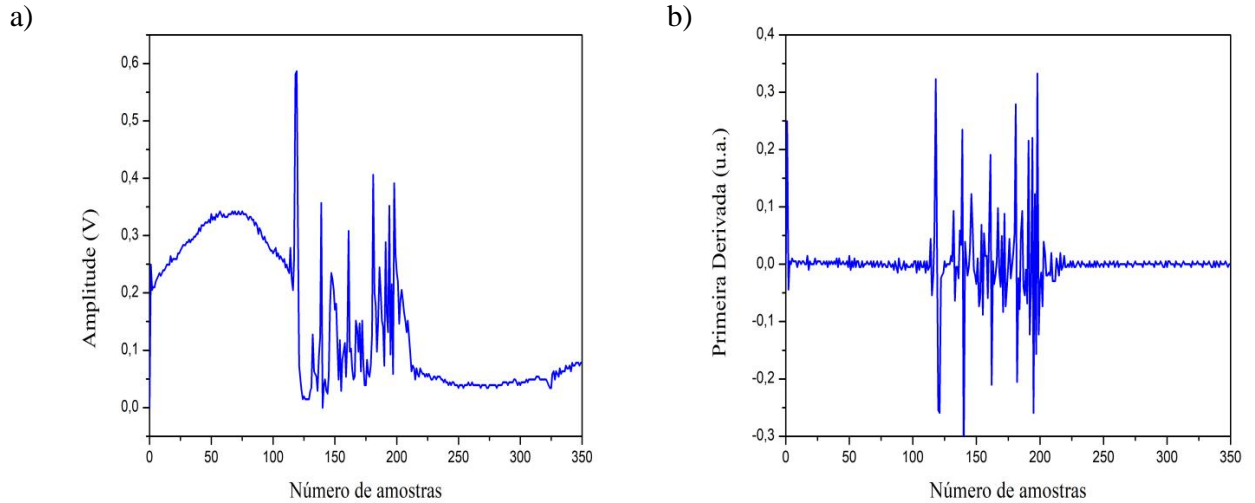
base sólida para o desenvolvimento do protótipo do sensor. Os experimentos confirmaram a sensibilidade da configuração SMS a vibrações mecânicas, a estabilidade dos componentes ópticos selecionados, o funcionamento adequado da eletrônica embarcada e a viabilidade mecânica da integração do sensor em aplicações associadas ao monitoramento de estruturas ferroviárias.

### **5.1.2 Teste de campo com VLT**

A avaliação em campo do sensor óptico em configuração SMS para detecção de trens foi iniciada por meio de passagens de um VLT pela região de sensoriamento. Os testes foram realizados em uma linha em operação, em condições reais de serviço, o que permitiu observar o comportamento do sistema sob excitações e variabilidades típicas do ambiente ferroviário. A seguir, descrevem-se os registros obtidos em momentos distintos, enfatizando a evolução temporal do sinal medido e a análise pela primeira derivada, recurso adotado para evidenciar mudanças rápidas associadas à passagem do veículo.

A Figura 24(a) apresenta o sinal de tensão elétrica medido pelo sistema embarcado em função do número de amostras. No trecho inicial, correspondente à condição de fundo antes da entrada do VLT na seção monitorada, observa-se um comportamento relativamente suave, com baixa variabilidade. Com a aproximação e entrada do VLT na região de sensoriamento, o sinal passa a exibir flutuações intensas e picos pronunciados em amostras sucessivas, evidenciando a excitação mecânica do trilho decorrente da interação roda-trilho. Essas vibrações perturbam o padrão de interferência multimodal no trecho multimodo da configuração SMS, modulando a intensidade óptica e, conseqüentemente, a tensão convertida pelo sistema de leitura. Após a saída do veículo da região de detecção, a amplitude do sinal reduz-se e tende a estabilizar, podendo convergir para um patamar distinto daquele observado antes do evento, o que é consistente com efeitos transitórios e rearranjos mecânicos após a perturbação (por exemplo, microcurvatura da fibra e pequenas variações nas conexões ópticas).

Figura 24 – Resposta do sinal elétrico durante a primeira passagem de um VLT expressa como uma função do número de amostras: a) tensão elétrica medida adquirida pelo sistema de aquisição de dados de bordo. b) Primeira derivada do sinal, destacando as rápidas variações de amostra para amostra associadas às vibrações dos trilhos induzidas pela passagem do veículo.

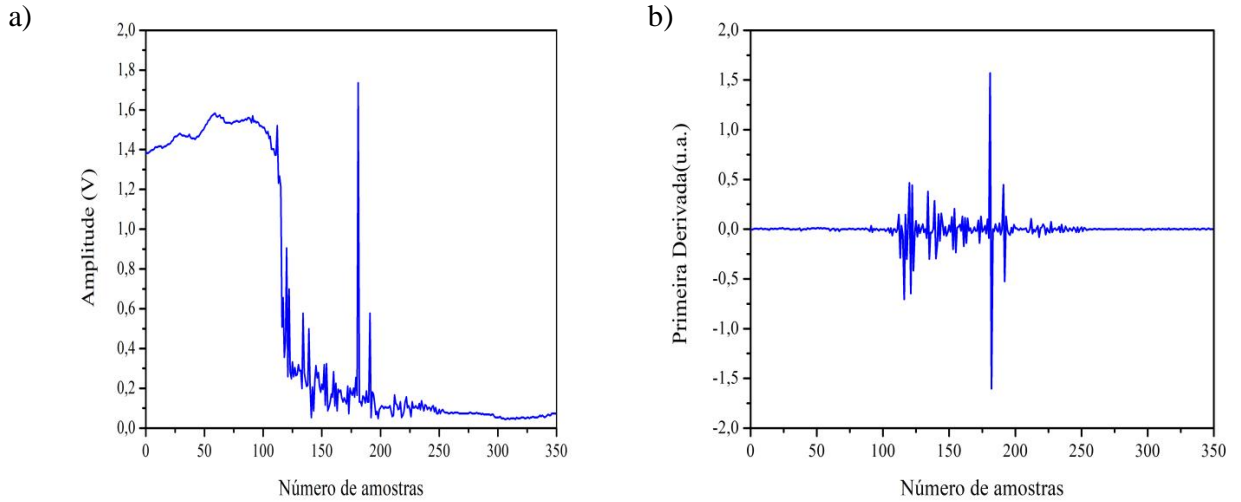


Fonte: Autor (2026).

A Figura 24(b), correspondente à primeira derivada do sinal, evidencia esse comportamento transitório: durante o fundo, a derivada permanece próxima de zero, indicando pequenas variações entre amostras consecutivas; no intervalo associado à passagem do VLT, surgem grandes excursões positivas e negativas, refletindo mudanças abruptas de amplitude; e, após o término do evento, a derivada retorna rapidamente a valores próximos de zero, compatível com a atenuação das perturbações dinâmicas.

Em relação ao segundo registro de passagem do VLT, a Figura 25(a) apresenta o registro referente à segunda passagem, ocorrida aproximadamente 40 minutos após o primeiro evento. Na porção inicial, verifica-se que o nível de base do sinal é diferente daquele observado na primeira aquisição, indicando que o sistema pode apresentar variações lentas e não estacionárias entre eventos sucessivos. Ainda assim, a assinatura do evento permanece claramente identificável: ao entrar na região de sensoriamento, o VLT induz uma transição abrupta do sinal, acompanhada por aumento pronunciado da variabilidade e ocorrência de picos de maior amplitude, associados às vibrações do trilho e às perturbações do padrão de interferência no sensor SMS. Após a passagem, o sinal volta gradualmente a um regime mais estável, podendo estabilizar em um nível distinto do trecho de fundo anterior ao evento.

Figura 25 – Resposta do sinal elétrico durante a segunda passagem de um VLT, expressa em função do número de amostras: a) tensão elétrica medida adquirida pelo sistema de aquisição de dados de bordo. b) Primeira derivada do sinal, destacando as variações de amostra para amostra induzidas pelas vibrações dos trilhos durante a passagem do veículo.

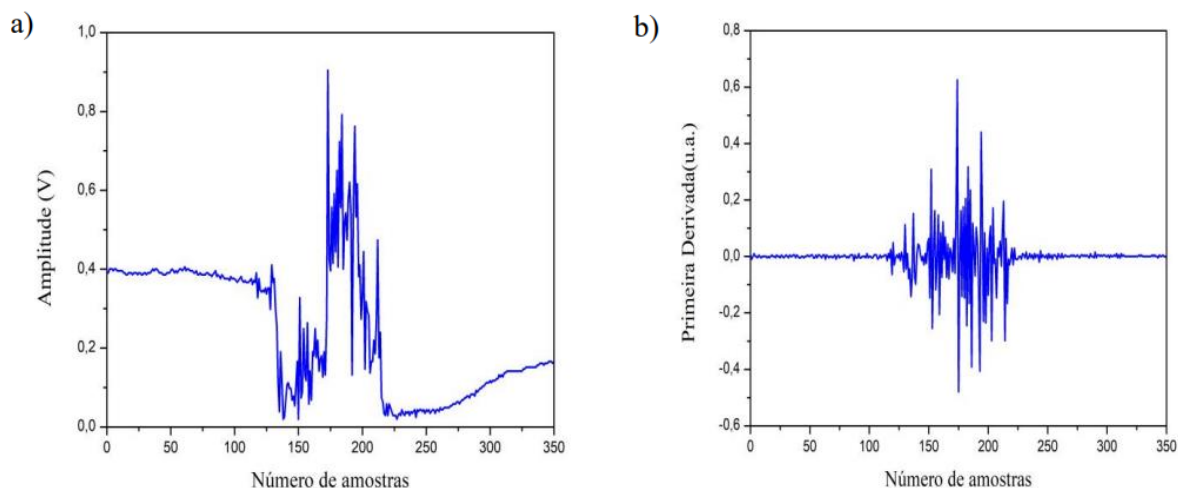


Fonte: Autor (2026).

A Figura 25(b) mostra a primeira derivada do sinal para essa segunda passagem. Observa-se que, no fundo, a derivada se mantém próxima de zero, enquanto durante a passagem do VLT aparecem excursões positivas e negativas intensas, com picos de magnitude elevada. Em seguida, os valores retornam ao regime próximo de zero após o término do evento, reforçando a característica transitória da perturbação mecânica.

No que diz respeito ao registro do terceiro evento, a Figura 26(a) apresenta o registro relativo à terceira passagem, realizada aproximadamente 40 minutos após a segunda. O trecho de fundo mantém comportamento relativamente estável, com baixa variabilidade antes da chegada do VLT. Durante a passagem, observa-se novamente aumento expressivo da variabilidade e múltiplos picos em amostras consecutivas, evidenciando que a excitação vibroacústica do trilho é consistentemente capturada pelo sensor. Após o evento, verifica-se uma redução abrupta e posterior recuperação gradual da amplitude, com estabilização em patamar que pode diferir do nível pré-evento e também dos níveis observados nas passagens anteriores, o que reforça o caráter não estacionário das medições em ambiente real.

Figura 26 – Resposta do sinal elétrico durante a terceira passagem de um VLT, expressa em função do número de amostras: a) tensão elétrica medida adquirida pelo sistema de aquisição de dados de bordo. b) Primeira derivada do sinal, destacando as variações de amostra para amostra induzidas pelas vibrações dos trilhos durante a passagem do veículo.



Fonte: Autor (2026).

A Figura 26(b) mostra a primeira derivada do sinal durante a terceira passagem. No fundo, a derivada permanece próxima de zero, enquanto no intervalo do evento observa-se um conjunto de excursões positivas e negativas significativas, correspondentes às mudanças rápidas e irregulares da tensão induzidas por vibrações intensas. Após a saída do VLT da área monitorada, a derivada retorna ao regime próximo de zero, indicando o restabelecimento das condições de fundo.

De forma geral, os três registros demonstram que, embora os níveis de base e detalhes finos da forma de onda possam variar entre eventos, a passagem do VLT produz de maneira consistente uma região caracterizada por aumento de variabilidade do sinal e por grandes variações entre amostras consecutivas, evidenciadas pela primeira derivada. Esse comportamento sustenta o emprego de estratégias de detecção baseadas em métricas orientadas pela variação do sinal (por exemplo, derivada, energia e variância), em detrimento de limiares absolutos de tensão, especialmente em condições de campo sujeitas a deriva e não estacionariedade.

Adicionalmente, para avaliar possíveis interferências externas, foram analisados sinais adquiridos durante a passagem de veículos leves, como automóveis e motocicletas, nas proximidades da área de sensoriamento. Nessas condições, não foram observadas alterações relevantes além do ruído de fundo previamente caracterizado. A avaliação no domínio da

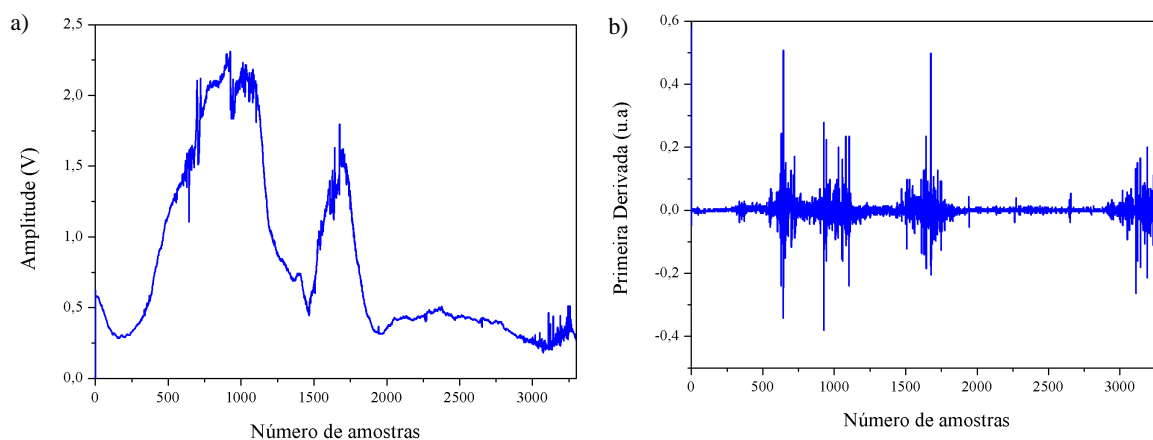
frequência indicou que esses registros concentram energia em componentes próximas de zero, com baixa magnitude quando comparados à assinatura associada à passagem do VLT. Em função da ausência de variação mensurável, os gráficos correspondentes não foram incluídos, e conclui-se que o tráfego leve nas imediações não compromete a detecção do evento de interesse.

### **5.1.3 Teste de campo com trem de carga**

Os testes com trem de carga tiveram como objetivo avaliar a resposta do sensor SMS diante de excitações mecânicas associadas a um veículo ferroviário de elevada massa. Diferentemente dos ensaios com o VLT, essas medições não foram realizadas em condições regulares de operação comercial e o trem encontrava-se sem carga, sendo empregado apenas o trem, sem composição carregada, para a realização das passagens controladas. Nesta etapa, foram analisadas duas passagens em velocidades distintas, 5 km/h e 15 km/h, mantendo-se a mesma condição do veículo entre os ensaios, de modo a evidenciar a influência da velocidade na assinatura vibratória registrada.

A Figura 27(a) apresenta o sinal de tensão medido durante a passagem do trem de carga a 5 km/h. No trecho inicial, correspondente à condição de fundo, o sinal mantém baixa variabilidade, refletindo predominantemente ruído e oscilações mecânicas de pequena amplitude. Com a entrada do trem na região de sensoriamento, observa-se o surgimento de uma região de perturbação claramente distinguível, marcada por aumento da amplitude e pela ocorrência de picos sucessivos, compatíveis com a excitação mecânica imposta ao trilho pela interação roda-trilho. Mesmo em baixa velocidade, a massa do veículo ferroviário gera vibrações com conteúdo energético significativamente superior ao nível de fundo, formando uma assinatura evidente ao longo do evento.

Figura 27 – Sinais de vibração adquiridos durante a passagem do trem de carga operando a 5 km/h: (a) saída bruta do sensor e (b) primeira derivada do sinal.

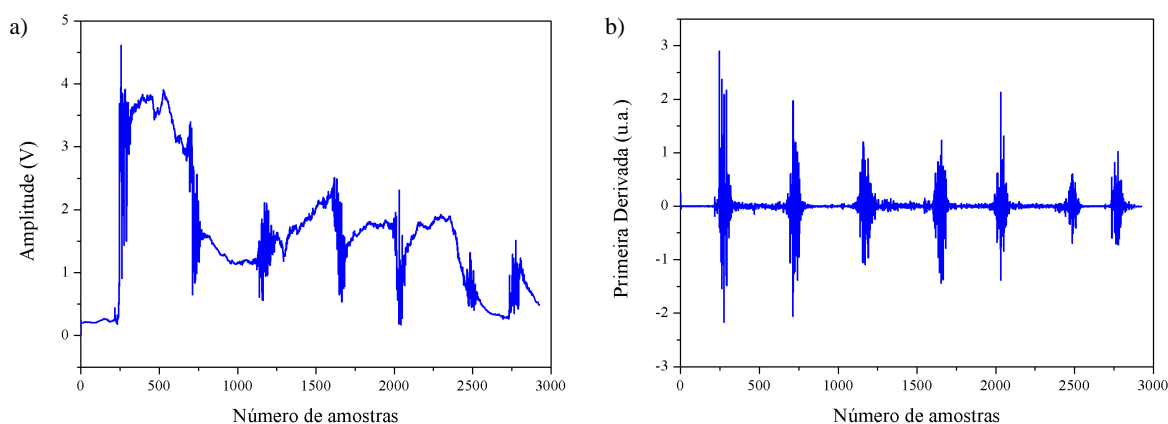


Fonte: Autor (2026).

A Figura 27(b) apresenta a primeira derivada do mesmo sinal. Durante o fundo, a derivada permanece próxima de zero, indicando pequenas variações entre amostras consecutivas. Durante a passagem do trem, aparecem excursões positivas e negativas bem definidas, evidenciando transientes associados a mudanças rápidas na intensidade de vibração ao longo da passagem da locomotiva e dos vagões. Após o término do evento, a derivada retorna ao regime de baixa amplitude, coerente com o restabelecimento das condições de fundo.

A Figura 28(a) apresenta o sinal medido durante a passagem do trem de carga a 15 km/h. Assim como no caso anterior, o trecho inicial corresponde ao fundo, com baixa variabilidade. Durante a passagem, observa-se uma região de excitação marcada por sucessivos picos e por elevação do envelope do sinal, refletindo vibrações induzidas pelo trem ao trilho. Em comparação ao caso de 5 km/h, o evento se concentra em um intervalo temporal menor, visto que o trem atravessa a região de detecção em menos tempo, resultando em maior densidade de perturbações dentro da janela de amostragem. Nesse cenário, a velocidade mais elevada aumenta a taxa de eventos de contato roda-trilho ao longo do tempo registrado, tornando o sinal mais concentrado em transientes dentro do intervalo de passagem.

Figura 28 – Sinais de vibração adquiridos durante a passagem do trem de carga operando a 15 km/h: (a) saída bruta do sensor e (b) primeira derivada do sinal.



Fonte: Autor (2026).

A Figura 28(b) mostra a primeira derivada correspondente, evidenciando maior concentração de transientes durante o intervalo do evento, com picos positivos e negativos ocorrendo de forma mais frequente no tempo amostrado. Como o trem estava sem carga e a condição do veículo foi mantida constante entre as duas passagens, as diferenças observadas no padrão temporal e na densidade de transientes são atribuídas, principalmente, ao efeito da velocidade sobre a dinâmica da excitação mecânica transmitida ao trilho.

Em síntese, os registros obtidos com o trem de carga (sem carga) indicam que o sensor SMS distingue claramente o regime de fundo da passagem do trem e apresenta sensibilidade para capturar alterações no padrão temporal de vibração associadas à variação de velocidade. Além disso, os resultados reforçam a adequação de estratégias de detecção baseadas em métricas orientadas pela variação/energia do sinal (por exemplo, derivada, energia e variância), mais robustas do que limiares absolutos de tensão em cenários sujeitos a deriva e não estacionariedade.

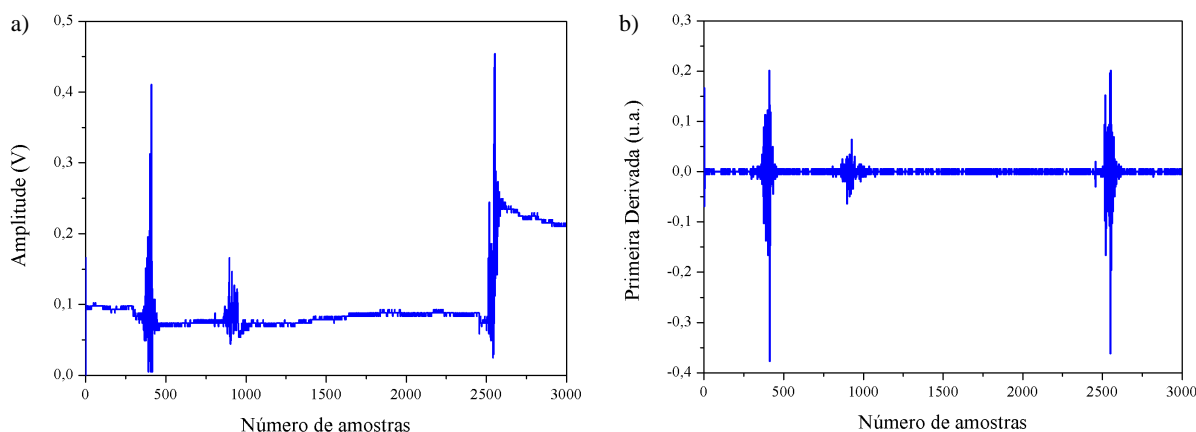
#### **5.1.4 Teste de campo com trem de manutenção**

O teste com o trem de manutenção foi realizado para avaliar a capacidade do sensor SMS em detectar veículos ferroviários de menor massa e, conseqüentemente, com menor excitação vibroacústica no trilho. Nesta etapa, foram utilizados os mesmos laços ópticos SMS e o mesmo sistema embarcado de aquisição de dados empregados nos ensaios com o trem de carga, assegurando consistência experimental e permitindo comparação direta entre as assinaturas de

vibração registradas.

A Figura 29(a) apresenta o sinal de tensão medido ao longo de aproximadamente 3000 amostras durante a janela de observação do experimento. No trecho de fundo, observa-se um nível de amplitude reduzido e baixa variabilidade, compatíveis com ruído de fundo e pequenas oscilações ambientais. Ao longo do registro, três regiões de perturbação destacam-se nitidamente, indicando três passagens distintas do trem de manutenção sobre a região de detecção. Cada passagem se manifesta como um aumento abrupto da amplitude, com picos bem definidos, seguido de retorno ao nível de fundo, caracterizando eventos transitórios separados no tempo.

Figura 29 – Sinais de vibração adquiridos durante a passagem do trem de manutenção: (a) saída bruta do sensor e (b) primeira derivada do sinal.



Fonte: Autor (2026).

. A Figura 29(b) apresenta a primeira derivada do mesmo sinal. No trecho de fundo, a derivada permanece próxima de zero, indicando variações mínimas entre amostras consecutivas. Em contraste, durante cada uma das três passagens, observam-se excursões positivas e negativas localizadas, refletindo as variações rápidas associadas à entrada e à saída do veículo na região sensora. A forma e a magnitude dessas excursões são coerentes com eventos de vibração de menor intensidade quando comparados aos registros do trem de carga, o que é compatível com a menor massa e menores cargas por eixo típicas de veículos de manutenção.

Do ponto de vista do método de detecção, o registro evidencia que eventos de menor energia também produzem aumento perceptível da variabilidade do sinal e transientes claramente identificáveis pela derivada. Dessa forma, mesmo com menor conteúdo energético, as três passagens são distinguíveis do regime de fundo, reforçando a aplicabilidade do algoritmo

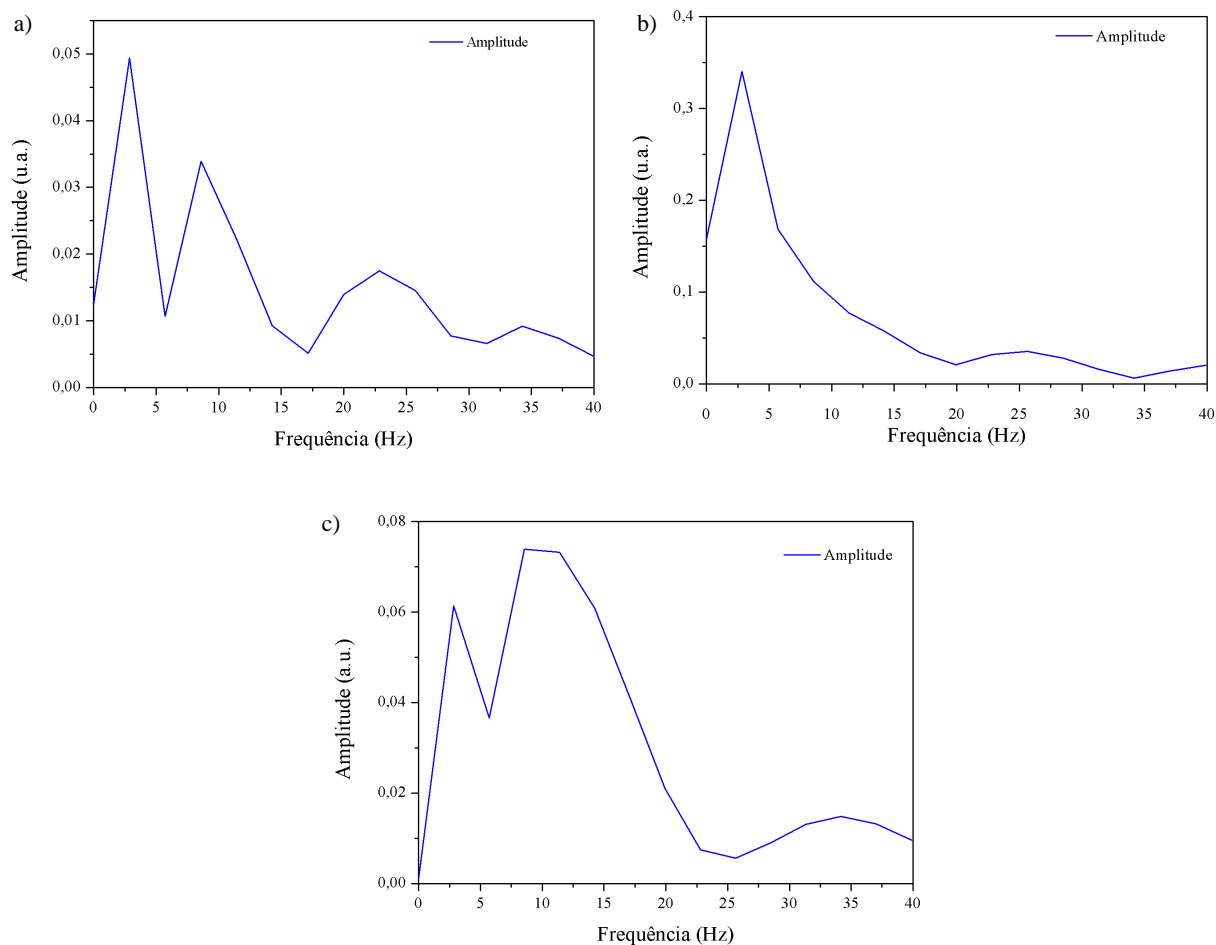
baseado em métricas orientadas pela variação do sinal (por exemplo, variância e derivada) para detecção robusta em diferentes classes de veículos ferroviários.

### ***5.1.5 Análise no domínio da frequência***

Além da análise no domínio do tempo, os sinais obtidos com o sensor SMS foram avaliados no domínio da frequência por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), com foco na banda de baixa frequência até 40 Hz. Essa faixa foi selecionada por concentrar o conteúdo espectral dominante associado às vibrações induzidas pela interação roda-trilho, enquanto componentes acima desse limite apresentaram contribuição pouco relevante para a comparação entre eventos. As Figuras 30, 31 e 32 apresentam, respectivamente, os espectros de amplitude, em unidades arbitrárias, para o VLT, para o trem de carga em duas velocidades e para o trem de manutenção.

A Figura 30 reúne os espectros correspondentes a três passagens consecutivas do VLT, restringindo-se à faixa até 40 Hz. Observa-se que, em todos os casos, a energia espectral permanece predominantemente concentrada em baixas frequências, com diferenças na distribuição de amplitudes entre as passagens.

Figura 30 – Espectros de amplitude em função da frequência obtidos durante diferentes passagens do evento monitorado: (a) primeira passagem, (b) segunda passagem e (c) terceira passagem.



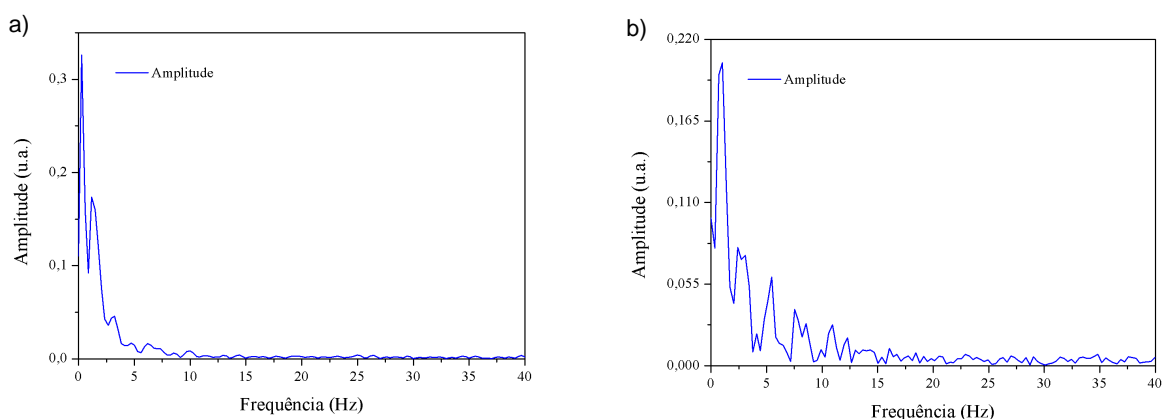
Fonte: Autor (2026).

Na primeira passagem, representada na Figura 30(a), o espectro apresenta distribuição mais irregular ao longo da banda analisada, com pico pronunciado em frequências muito baixas e componentes secundários em frequências intermediárias, indicando a contribuição simultânea de mais de um componente vibracional relevante. Na segunda passagem, representada na Figura 30(b), a resposta é significativamente mais intensa e concentrada abaixo de aproximadamente 5 Hz, com decaimento gradual ao longo da banda, sugerindo predominância de mecanismos vibracionais estruturais de muito baixa frequência. Já a terceira passagem, Figura 30(c), exibe comportamento intermediário, com múltiplos picos na região de baixa frequência, notadamente entre aproximadamente 5 Hz e 12 Hz, seguido de redução progressiva em direção a frequências mais altas. Em conjunto, esses resultados confirmam que a assinatura espectral do VLT é dominada por componentes de baixa frequência, embora a estrutura fina do espectro varie

entre eventos sucessivos, refletindo a variabilidade operacional típica de medições em campo.

Em relação ao trem de carga, a Figura 31 apresenta os espectros de amplitude obtidos durante a passagem do trem de carga nas velocidades de 5 km/h e 15 km/h, também na faixa até 40 Hz. Em ambas as condições, observa-se forte predominância de componentes de frequência muito baixa, com maior amplitude concentrada abaixo de aproximadamente 2 Hz.

Figura 31 – Espectros de amplitude em função da frequência obtidos durante a passagem do trem de carga operando em diferentes velocidades: (a) 5 km/h e (b) 15 km/h. Os espectros destacam mudanças na distribuição de energia espectral associadas a efeitos dinâmicos dependentes da velocidade, enquanto a massa do trem permanece constante.



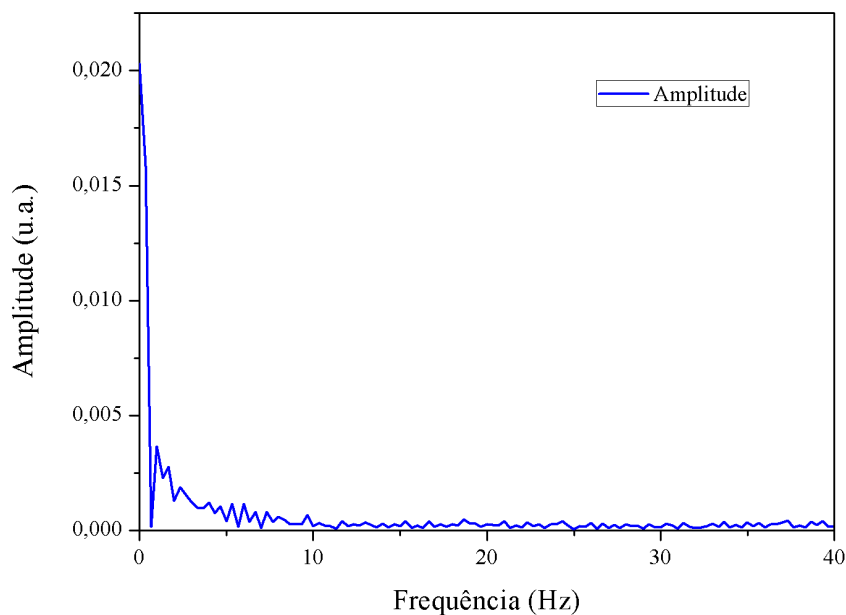
Fonte: Autor (2026).

Para 5 km/h, Figura 31 (a), o espectro apresenta poucos componentes destacados e perfil suave, indicando um regime de excitação predominantemente de baixa taxa, compatível com uma interação roda–trilho mais quase-estática na janela observada. Para 15 km/h, Figura 31(b), permanece a concentração em baixas frequências, com pico pronunciado abaixo de 2 Hz e decaimento gradual com o aumento da frequência. Embora apareçam flutuações dispersas na faixa entre aproximadamente 5 Hz e 15 Hz, não se observam picos estreitos bem definidos, sugerindo que o aumento de velocidade intensifica principalmente a magnitude das vibrações estruturais de baixa frequência, sem deslocar a energia para componentes de frequência mais alta. Assim, mesmo mantendo-se a mesma condição do veículo entre os ensaios (trem sem carga), a velocidade influencia o padrão espectral, elevando amplitudes e ampliando discretamente a ocupação da banda de baixa frequência.

Para o trem de manutenção, a Figura 32 mostra o espectro do sinal associado ao trem de manutenção. Nota-se que o conteúdo espectral é ainda mais concentrado nas frequências imediatamente acima de 0 Hz, com rápida atenuação já em torno de aproximadamente 2 Hz. A partir desse ponto, a amplitude se aproxima do nível de ruído e permanece baixa ao

longo do restante da banda até 40 Hz, indicando que o conteúdo vibracional mensurável está essencialmente restrito à região de frequência muito baixa. Em comparação com o VLT e o trem de carga, esse comportamento é coerente com a menor excitação mecânica típica de veículos de manutenção, refletindo menor energia vibracional transmitida ao trilho.

Figura 32 – Espectro de amplitude em função da frequência obtido durante a passagem do trem de manutenção.



Fonte: Autor (2026).

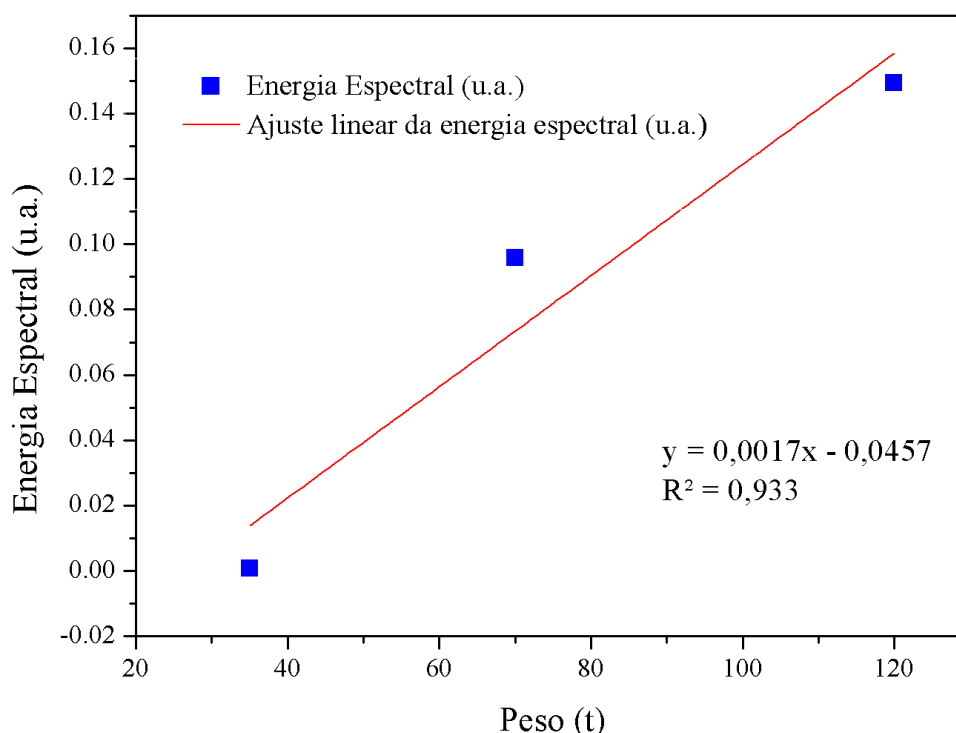
De modo geral, a análise espectral evidencia que o sensor SMS captura principalmente vibrações estruturais de baixa frequência, com assinaturas distintas entre classes de veículos e condições operacionais. Enquanto o trem de carga concentra energia de forma mais pronunciada em frequências muito baixas (abaixo de 2 Hz), o VLT tende a apresentar componentes distribuídos até a faixa de aproximadamente 10–12 Hz em algumas passagens, e o trem de manutenção mostra rápida atenuação após 2 Hz. Essas diferenças reforçam o potencial do uso de características no domínio da frequência, especialmente na banda de baixa frequência, como suporte a estratégias de detecção e, em perspectiva, de discriminação entre tipos de veículos ferroviários.

### 5.1.6 Sensitividade do Sensor

Para complementar a análise no domínio do tempo e no domínio da frequência, foi realizada uma etapa adicional de quantificação global do evento, na qual a resposta do sensor foi

resumida por uma única métrica energética. O objetivo foi comparar, de forma direta, diferentes classes de veículos ferroviários e verificar se a energia do sinal apresenta relação sistemática com o peso do veículo, permitindo estimar a sensibilidade do sistema. A Figura 33 apresenta essa correlação entre a energia espectral do sinal medido e a carga associada a cada tipo de veículo avaliado.

Figura 33 – Energia espectral (0-12 Hz) versus peso do veículo, com ajuste de regressão linear (inclinação = 0,0017 u.a./t;  $R^2 = 0,933$ ).



Fonte: Autor (2026).

A Figura 33 apresenta a avaliação da sensibilidade do sensor óptico baseado em vibração a partir da relação entre a energia espectral do sinal medido e o peso dos veículos ferroviários analisados. Para isso, a energia do sinal no domínio do tempo foi definida como:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt. \quad (5.1)$$

Em que  $x(t)$  representa a amplitude de vibração (em unidades arbitrárias) obtida pelo sistema de aquisição do sensor SMS.

Pelo teorema de Parseval, a energia calculada no domínio do tempo é equivalente à energia calculada no domínio da frequência. Assim, na implementação prática adotou-se o

cálculo da energia a partir do espectro do sinal, por meio da soma ou integral discreta do quadrado da magnitude da FFT em uma banda restrita. Considerou-se a faixa de 0 a 12 Hz, uma vez que a resposta espectral obtida nos ensaios indicou que a maior parte do conteúdo energético do sinal se concentra em baixas frequências. Acima desse limite, observa-se atenuação progressiva e amplitudes próximas ao nível de ruído, o que torna a contribuição das componentes de alta frequência pouco representativa para fins de correlação entre eventos.

Três classes de veículos foram consideradas na análise: trem de manutenção de 35 t, veículo leve sobre trilhos de 75 t e trem de carga 120 t. Os ensaios com o trem de manutenção e com o trem de carga foram realizados em condições controladas, com velocidades entre 15 e 20 km/h, enquanto o VLT foi monitorado em linha em operação, com velocidade média aproximada de 40 km/h. Embora a velocidade influencie o regime de excitação dinâmica, dentro da faixa investigada (15 – 40 km/h) observou-se que o efeito do peso do veículo se destaca como fator predominante na energia medida, pois a resposta do trilho permanece fortemente governada pela transferência de carga e pela excitação estrutural de baixa frequência.

A Figura 33 mostra que a energia espectral cresce com o aumento do peso do veículo, apresentando correlação aproximadamente linear. O ajuste linear obtido foi:

$$E = 0,0017W - 0,0457. \quad (5.2)$$

Em que  $E$  é a energia espectral (u.a.) e  $W$  é o peso do veículo (t). O coeficiente de determinação  $R^2 = 0,933$  indica forte aderência do modelo linear aos dados analisados.

A inclinação da reta, igual a 0,0017 u.a./t, pode ser interpretada como a sensibilidade do sensor na métrica proposta, pois quantifica o incremento de energia espectral associado a cada tonelada adicional aplicada ao trilho. Esse resultado corrobora que veículos mais pesados induzem vibrações proporcionalmente mais energéticas e confirma que o sistema óptico é capaz de capturar essa variação de forma consistente. Além de apoiar a detecção confiável dos eventos, essa correlação abre perspectiva para duas aplicações complementares: estimativa quantitativa de carga, por meio de calibração baseada em energia espectral, e discriminação prática de classes de veículos ferroviários, utilizando assinaturas de energia em baixa frequência como característica global do evento.

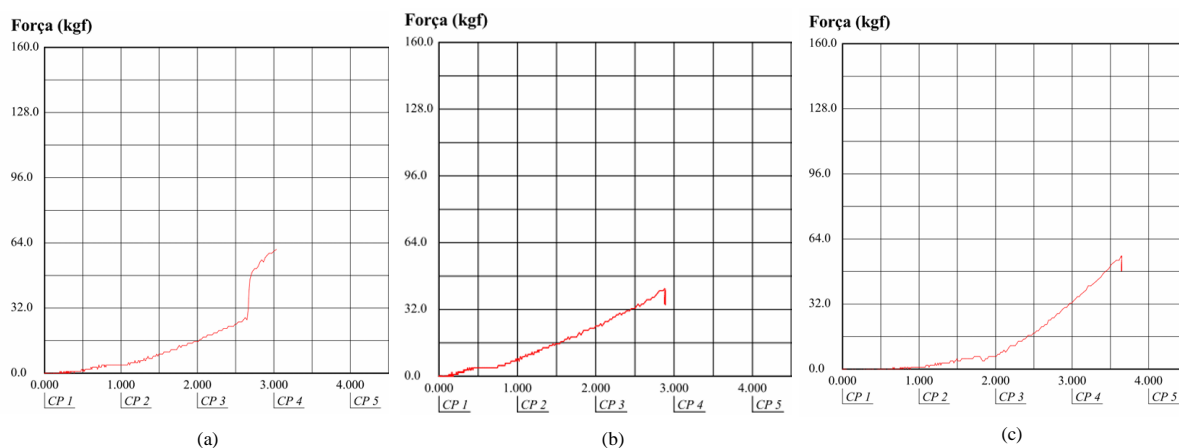
## 5.2 Sensor de peso em movimento usando FBG: resultados e discussões

### 5.2.1 Análise Mecânica das Borrachas de Silicone com Diferentes Concentrações de Catalisador

A seleção do material elastomérico utilizado no sistema de amortecimento e proteção das FBGs foi realizada a partir da análise experimental das propriedades mecânicas de amostras de borracha de silicone com diferentes concentrações de catalisador. O objetivo principal foi determinar uma composição que apresentasse comportamento mecânico adequado para a aplicação em um sistema de pesagem dinâmica, garantindo simultaneamente a integridade estrutural da fibra óptica e uma adequada transmissão de deformação ao sensor.

Nos testes de avaliação das propriedades mecânicas, foram utilizadas borrachas de silicone da Redelease curadas em laboratório e foram realizados ensaios de compressão em uma máquina universal de ensaios, a partir dos quais foram obtidas as curvas tensão–deformação ou força-deformação das amostras ilustradas na Figura 34. A força mecânica aplicada ao material foi determinada pela relação entre a força aplicada e a área da seção transversal da amostra, conforme apresentado na Equação 5.3.

Figura 34 – Curvas de força em função da deformação obtidas nos ensaios de compressão das amostras de borracha de silicone com diferentes concentrações de catalisador: (a) 3%, (b) 4% e (c) 5%.



Fonte: Autor (2026).

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (5.3)$$

Onde  $\sigma$  representa a tensão mecânica,  $F$  é a força aplicada e  $A$  corresponde à área da seção transversal da amostra.

A deformação relativa do material foi calculada pela razão entre a variação de comprimento e o comprimento inicial da amostra, conforme descrito na Equação 5.4.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (5.4)$$

Onde  $\varepsilon$  representa a deformação,  $\Delta L$  é a variação de comprimento observada durante o ensaio e  $L_0$  corresponde ao comprimento inicial da amostra.

A partir das curvas tensão–deformação obtidas experimentalmente, foi possível determinar o módulo de elasticidade do material na região elástica linear. Esse parâmetro foi calculado a partir da inclinação da curva tensão–deformação, conforme a Equação 5.5.

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}. \quad (5.5)$$

Onde  $E$  representa o módulo de elasticidade (ou módulo de Young) do material. Considerando a geometria cilíndrica das amostras utilizadas nos testes, a rigidez equivalente do elemento elastomérico pode ser expressa pela Equação 5.6.

$$k = \frac{E \cdot A}{L_0}. \quad (5.6)$$

Onde  $k$  representa a rigidez do elemento elastomérico. As amostras analisadas apresentaram concentrações de catalisador de 3%, 4% e 5%. Os valores de módulo de elasticidade obtidos experimentalmente são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Módulo de elasticidade das amostras de borracha de silicone para diferentes concentrações de catalisador.

<b>Amostra</b>	<b>Concentração de Catalisador (%)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (N/cm<sup>2</sup>)</b>
A1	3	254,96
A2	4	309,84
A3	5	541,53

Fonte: Autor (2026).

Observa-se que o aumento da concentração de catalisador promove um incremento no módulo de elasticidade da borracha, indicando um aumento da rigidez do material. Esse comportamento está associado ao aumento da densidade de ligações cruzadas formadas durante o processo de cura do silicone.

Além da análise do módulo de elasticidade, o comportamento mecânico das amostras foi avaliado a partir das curvas tensão–deformação obtidas nos ensaios de compressão. A amostra com concentração de 3% apresentou comportamento mecânico instável em determinadas faixas de carga, além de ruptura estrutural em aproximadamente 53 kgf, o que inviabiliza sua utilização em aplicações sujeitas a cargas elevadas.

A amostra com 4% de catalisador apresentou comportamento aproximadamente linear na região elástica; entretanto, observou-se uma saturação prematura da deformação em torno de 36 kgf, limitando sua capacidade de suportar cargas mais elevadas.

Por sua vez, a amostra com 5% de catalisador apresentou um comportamento distinto, caracterizado por uma deformação inicial relativamente elevada para pequenas cargas aplicadas. Foi observado um percentual de deformação inicial próximo de 19% para uma carga de aproximadamente 7 kgf, indicando uma maior flexibilidade inicial do material.

Esse comportamento possui implicações importantes no contexto da integração com sensores FBG. Uma deformação inicial excessiva pode resultar na aplicação de tensões mecânicas elevadas sobre a fibra óptica, aumentando o risco de falha mecânica do sensor, especialmente em condições de carregamento dinâmico.

A Tabela 5 apresenta um resumo comparativo das principais características observadas nas amostras analisadas.

Tabela 5 – Comparação das propriedades mecânicas das amostras de borracha analisadas.

<b>Concentração (%)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (N/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Comportamento Mecânico</b>	<b>Limitações Observadas</b>
3	254,96	Baixa rigidez	Instabilidade e ruptura estrutural
4	309,84	Comportamento aproximadamente linear	Saturação prematura da deformação
5	541,53	Maior flexibilidade inicial	Deformação inicial elevada

Fonte: Autor (2026).

De forma geral, os resultados experimentais indicam que o aumento da concentração de catalisador resulta em um incremento significativo da rigidez do material. Entretanto, a escolha da composição ideal deve considerar não apenas a resistência mecânica do elastômero, mas também sua interação mecânica com o sensor de fibra óptica, de modo a evitar deformações excessivas que possam comprometer a integridade estrutural da FBG.

A partir da análise comparativa apresentada na Tabela 5, observa-se que a concentração de catalisador influencia diretamente as propriedades mecânicas da borracha de silicone, especialmente no que se refere ao módulo de elasticidade e ao comportamento estrutural sob compressão.

A amostra com concentração de 3% apresentou o menor módulo de elasticidade entre as composições analisadas, indicando baixa rigidez do material. Durante os ensaios mecânicos foram observados comportamentos instáveis na curva tensão–deformação, além de ocorrência de ruptura estrutural em níveis relativamente baixos de carregamento. Esse comportamento indica que tal composição não apresenta resistência mecânica adequada para aplicações submetidas a cargas repetitivas e elevadas, como ocorre no sistema de pesagem baseado em sensores FBG.

Por outro lado, a amostra com concentração de 5% apresentou o maior módulo de elasticidade entre as três composições avaliadas. Entretanto, observou-se uma deformação inicial elevada para pequenas cargas aplicadas, indicando uma maior flexibilidade inicial do material. Esse comportamento pode resultar na transferência excessiva de deformação para a fibra óptica, aumentando o risco de falha mecânica ou degradação do sensor em condições de operação dinâmica.

Nesse contexto, a amostra com 4% de catalisador apresentou o comportamento mais equilibrado entre rigidez mecânica e estabilidade estrutural. Essa composição apresentou comportamento aproximadamente linear na região elástica, com módulo de elasticidade intermediário entre as demais amostras e sem evidência de instabilidade estrutural significativa durante os ensaios. Dessa forma, a concentração de 4% mostrou-se a mais adequada entre as composições avaliadas, proporcionando um compromisso adequado entre resistência mecânica, estabilidade do material e compatibilidade com o sensor de fibra óptica.

Portanto, considerando os resultados experimentais obtidos, a concentração de 4% de catalisador foi selecionada como a mais apropriada para a fabricação dos elementos elastoméricos utilizados no sistema de amortecimento e proteção das grades de Bragg em fibra óptica.

### ***5.2.2 Testes estáticos em laboratório com máquina universal de ensaio***

Com o objetivo de avaliar a resposta do sensor em condições controladas, foram realizados ensaios estáticos em máquina universal de ensaio, com aplicação de cargas variando de 500 a 1500 kgf, conforme apresentado na Seção 4. Durante os testes controlados em laboratório, a carga foi aplicada sempre na mesma região do dispositivo, correspondente à grade de Bragg

centrada em 835 nm, de modo a garantir uniformidade na condição de carregamento ao longo dos ensaios. Para cada nível de carga, foram executadas quatro repetições experimentais, permitindo analisar não apenas a sensibilidade do sensor, mas também a repetibilidade das medições

A Tabela 6 apresenta os valores obtidos para cada repetição, bem como a média e o desvio associado a cada carga aplicada. Observa-se, de maneira geral, um crescimento progressivo da resposta do sensor com o aumento da carga, o que evidencia a sensibilidade da rede de Bragg à deformação mecânica imposta durante o ensaio. Para a carga de 500 kgf, a resposta média foi de 543,98  $\mu\epsilon$ , enquanto para 1500 kgf foi obtido valor médio de 746,54  $\mu\epsilon$ , indicando variação total de aproximadamente 202,56  $\mu\epsilon$  no intervalo investigado.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios estáticos para diferentes níveis de carga aplicada, considerando quatro ensaios experimentais, média e desvio padrão.

<b>Carga (kgf)</b>	<b>Ensaio 1 (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>Ensaio 2 (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>Ensaio 3 (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>Ensaio 4 (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
500	482,53	545,41	560,70	587,27	543,98	44,49
600	519,86	575,45	584,35	608,72	572,10	37,55
700	565,21	604,03	623,73	635,16	607,03	30,70
800	581,31	623,55	640,69	654,82	625,09	31,87
900	610,42	648,22	649,76	682,62	647,76	29,52
1000	611,98	640,89	665,47	680,81	649,79	30,09
1100	656,02	678,66	694,65	724,97	688,58	28,98
1200	658,33	697,99	681,19	721,63	689,79	26,74
1300	687,66	716,41	726,49	749,89	720,11	25,78
1400	707,39	731,05	750,96	765,36	738,69	25,16
1500	720,15	744,97	747,38	773,65	746,54	21,87

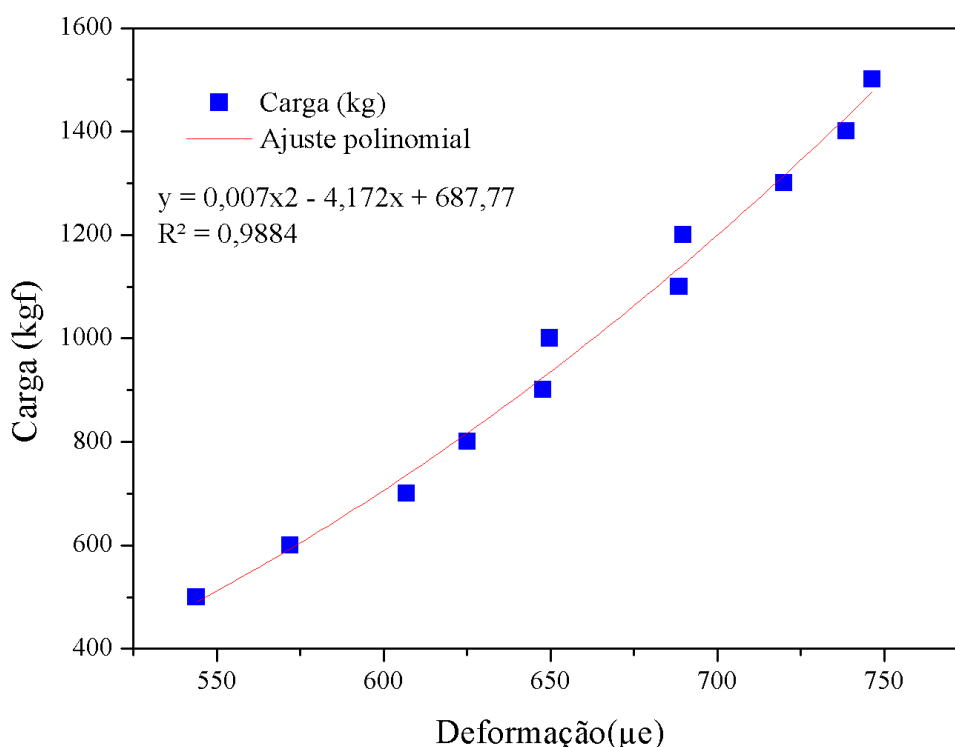
Fonte: Autor (2026).

Além do aumento monotônico da resposta média, nota-se que os resultados apresentaram boa consistência entre as repetições. Os maiores valores de dispersão foram observados nas menores cargas, como em 500 kgf, para a qual foi obtido desvio de 44,49  $\mu\epsilon$ , enquanto nas cargas mais elevadas os desvios tenderam a diminuir, atingindo 21,87  $\mu\epsilon$  em 1500 kgf. Esse comportamento sugere que a resposta do sensor se torna mais estável à medida que a carga aplicada aumenta, o que pode estar associado a uma melhor acomodação mecânica do sistema sob níveis mais elevados de solicitação.

A análise da repetibilidade é particularmente importante no contexto de calibração, uma vez que a confiabilidade da curva ajustada depende não apenas da tendência média da resposta, mas também da baixa variabilidade entre ensaios realizados sob a mesma condição de carregamento. Nesse sentido, a utilização das médias experimentais associadas aos respectivos desvios permite representar de forma mais robusta o comportamento do sensor, reduzindo

a influência de flutuações pontuais observadas em medições isoladas. A partir dos valores médios apresentados na Tabela 6, foi construída a curva de calibração do sensor, relacionando a deformação média medida com a carga aplicada. A Figura 35 mostra o gráfico correspondente, no qual se observa uma tendência crescente bem definida entre as variáveis. O ajuste dos dados experimentais por uma função polinomial de segunda ordem resultou na Equação 5.7.

Figura 35 – Curva de calibração do sensor FBG obtida a partir da deformação média medida em função da carga aplicada, com barras de erro associadas à repetibilidade experimental e ajuste polinomial de segunda ordem.



Fonte: Autor (2026).

$$\text{Carga} = 0,007x^2 - 4,172x + 687,77. \quad (5.7)$$

Em que  $x$  representa a deformação média medida pelo sensor, em  $\mu\epsilon$ , e a carga é expressa em kgf. O coeficiente de determinação obtido foi  $R^2 = 0,9884$ , indicando excelente concordância entre os dados experimentais e o modelo ajustado.

O elevado valor de  $R^2$  demonstra que a curva obtida é capaz de descrever adequadamente o comportamento do sensor no intervalo de calibração analisado. Embora a resposta apresente tendência aproximadamente linear, o ajuste polinomial de segunda ordem proporcionou melhor aderência aos dados experimentais, especialmente nas extremidades da faixa de carga.

Esse resultado indica que, para a faixa entre 500 e 1500 kgf, a relação entre carga aplicada e deformação medida não é estritamente linear, sendo mais bem representada por uma função quadrática.

A curva de calibração obtida constitui, portanto, a função de transferência experimental do sensor para as condições estáticas avaliadas. Em termos práticos, essa equação permite estimar a carga aplicada a partir da deformação medida pela rede de Bragg, dentro da faixa de operação investigada. Dessa forma, os resultados confirmam a viabilidade do uso do sensor como elemento de monitoramento de carga, uma vez que ele apresentou resposta crescente, boa repetibilidade e elevada correlação com os valores de carregamento aplicados na máquina universal de ensaio.

Verifica-se que, apesar da existência de dispersão entre as repetições, os valores médios seguem uma tendência bem definida, sem inversões ou inconsistências no comportamento global do sensor. Isso evidencia que o sistema apresentou resposta estável e adequada para fins de calibração estática. Em síntese, os resultados obtidos demonstram que o sensor baseado em rede de Bragg apresentou comportamento consistente ao longo da faixa de carregamento analisada, com boa repetibilidade entre as repetições e forte correlação entre deformação e carga. Tais características são fundamentais para a aplicação do dispositivo em sistemas de medição de carga, servindo como base para etapas posteriores de validação em condições mais próximas da operação real.

De forma complementar à etapa de calibração, foi realizada a validação da equação ajustada, com o objetivo de verificar sua capacidade de estimar a carga aplicada a partir da deformação média medida pelo sensor. Para essa etapa, foram considerados novos níveis de carregamento, diferentes daqueles empregados na construção da curva de calibração, especificamente 650, 850, 1050, 1250 e 1450 kgf. Para cada condição, foi obtida a média da deformação e, em seguida, aplicou-se a Equação 5.7 para calcular a carga correspondente.

A Tabela 7 apresenta os resultados dessa etapa de validação. A primeira coluna corresponde à carga real aplicada durante o ensaio. A segunda coluna, intitulada Deformação ( $\mu\epsilon$ ), apresenta o valor médio da deformação medida pelo sensor para cada nível de carregamento. A terceira coluna, Carga calculada (kgf), mostra o valor estimado por meio da equação de calibração a partir da deformação média experimental. Por fim, a coluna Erro (%) expressa a diferença percentual entre a carga real aplicada e a carga calculada pelo modelo.

Tabela 7 – Resultados da validação da equação de calibração para diferentes níveis de carga aplicada.

<b>Carga Real (kgf)</b>	<b>Deformação (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>Carga calculada (kgf)</b>	<b>Erro (%)</b>
650	633,28	853,05	31
850	659,09	978,85	15
1050	708,91	1248,06	19
1250	737,05	1415,47	13
1450	760,75	1565,08	8

Fonte: Autor (2026).

Os resultados mostram que a equação de calibração apresentou tendência de superestimar a carga em todos os pontos de validação analisados. Para a carga real de 650 kgf, por exemplo, a deformação média medida foi de 633,28  $\mu\epsilon$ , resultando em uma carga calculada de 853,05 kgf, com erro de 31%. Para 850 kgf, a carga estimada foi de 978,85 kgf, correspondente a erro de 15%. Já para 1050 kgf, 1250 kgf e 1450 kgf, foram obtidas cargas calculadas de 1248,06 kgf, 1415,47 kgf e 1565,08 kgf, com erros de 19%, 13% e 8%, respectivamente.

Observa-se, de maneira geral, que o erro percentual tende a diminuir com o aumento da carga aplicada, indicando que a equação ajustada apresenta melhor desempenho preditivo nas faixas mais elevadas de carregamento. Esse comportamento é coerente com os resultados observados na etapa de calibração, na qual também se verificou menor dispersão dos dados para cargas mais altas. Assim, embora a curva de calibração tenha apresentado elevado coeficiente de determinação, a validação evidencia que sua capacidade de predição não é uniforme ao longo de toda a faixa analisada, sendo mais precisa nos níveis superiores de carga.

Dessa forma, a etapa de validação confirma que a equação de calibração é capaz de descrever satisfatoriamente a tendência global de resposta do sensor, embora apresente erros relativamente maiores nas cargas mais baixas e intermediárias. Esses resultados são relevantes para a interpretação do desempenho do dispositivo, pois mostram que a função ajustada pode ser utilizada como ferramenta de estimativa de carga, desde que se considere a influência da faixa de operação sobre a precisão das predições. Com o objetivo de tornar a análise de dados mais robusta e confiável, optou-se também por avaliar modelos com base na métrica MAE (Mean Absolute Error), empregando a estratégia LORO (Leave-One-Repetition-Out). A partir dessa abordagem, buscou-se identificar o modelo de melhor desempenho preditivo e, posteriormente, realizar seu treinamento com os dados provenientes dos ensaios experimentais, visando aprimorar a estimativa de cargas a partir da curva de calibração obtida no modelo considerado mais adequado.

### 5.2.2.1 Modelagem e análise dos dados do sistema de pesagem com FBG

Com base nos dados experimentais obtidos nos ensaios controlados em laboratório, descritos nas subseções anteriores, foi realizada uma etapa complementar de modelagem com o objetivo de investigar estratégias matemáticas e computacionais mais adequadas para a estimativa de carga a partir da deformação medida pelo sensor. Embora a curva de calibração inicial tenha sido obtida por ajuste polinomial, a análise dos resultados de validação indicou a necessidade de avaliar modelos alternativos, capazes de fornecer maior robustez preditiva e melhor desempenho metrológico ao longo da faixa de operação investigada.

Para isso, os dados provenientes dos testes em máquina universal de ensaio foram organizados em um conjunto experimental contendo os níveis de carga aplicados e as respectivas respostas do sensor, considerando as repetições realizadas em laboratório. A partir desse conjunto, diferentes modelos de regressão foram testados, incluindo abordagens lineares, polinomiais e baseadas em métodos de aprendizado de máquina.

Os modelos de regressão foram avaliados com o objetivo de estimar o peso a partir das características extraídas do sinal óptico. Esse procedimento é repetido sucessivamente até que todas as repetições tenham sido utilizadas como validação. Essa abordagem foi adotada por ser particularmente adequada ao contexto experimental deste trabalho, uma vez que permite avaliar a capacidade de generalização dos modelos frente à variabilidade entre ensaios, ao mesmo tempo em que preserva a estrutura dos dados obtidos em laboratório. Para garantir uma avaliação robusta e evitar sobreajuste, foi adotada a estratégia de validação cruzada LORO, na qual cada execução experimental é utilizada sucessivamente como conjunto de teste enquanto as demais compõem o conjunto de treinamento.

Foram testados diferentes algoritmos de regressão, incluindo métodos lineares e baseados em ensembles. Entre eles estão *Linear Regression*, *Ridge*, *Lasso*, *ElasticNet* e *Bayesian Ridge*, que aplicam diferentes formas de regularização para controlar a complexidade do modelo. Também foram avaliados métodos baseados em árvores e ensembles, como *Random Forest (RF)*, *Extra Trees*, *Gradient Boosting Regressor (GBR)* e *AdaBoost*, que combinam múltiplos estimadores para melhorar a capacidade de generalização. Em alguns casos, foram utilizados termos polinomiais de segunda ordem (*Poly2*) para capturar possíveis relações não lineares entre as variáveis de entrada e o peso estimado.

Como critério principal de comparação entre os modelos, foi utilizada a métrica MAE (*Mean Absolute Error*), ou Erro Absoluto Médio, expressa em kgf. Essa métrica foi

escolhida por apresentar interpretação direta no problema em estudo, permitindo quantificar, em unidades de carga, o desvio médio entre os valores reais e os valores estimados pelo modelo. Além do MAE, também foram considerados outros parâmetros relevantes para a análise do desempenho, tais como o erro percentual médio, o erro máximo, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e um indicador de consistência o que avalia a estabilidade das previsões entre diferentes execuções da validação cruzada. .

Os resultados apresentados na Tabela 8 mostram que o modelo AdaBoost com expansão polinomial de segunda ordem (*Poly2*) apresentou o melhor desempenho geral, obtendo o menor erro absoluto médio (MAE = 14,6 kgf) e erro percentual médio de 1,43%, mantendo um coeficiente de determinação elevado ( $R^2 = 0.9827$ ). Outros modelos baseados em expansão polinomial, como *GBR<sub>50</sub> Poly2* e *RidgePoly2*, também apresentaram bom desempenho, indicando que a inclusão de termos polinomiais contribui significativamente para capturar a relação entre os parâmetros do sinal e o peso.

Tabela 8 – Top 10 modelos avaliados para estimativa de peso utilizando validação cruzada LORO.

<b>Modelo</b>	<b>MAE (kgf)</b>	<b>Erro (%)</b>	<b>Erro Máximo (%)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Consistência</b>
AdaBoost Poly2	14,6	1,43	10,0	0,9827	1,01
GBR_50 Poly2	17,2	1,73	7,2	0,9832	0,93
Ridge Poly2	24,5	2,62	7,6	0,9917	0,96
BayesianRidge Poly2	25,0	2,68	7,7	0,9916	0,97
ElasticNet Poly2	25,1	2,69	7,8	0,9910	0,96
Lasso Poly2	25,7	2,73	8,0	0,9907	0,97
Linear Poly2	26,6	2,85	7,4	0,9916	0,98
RF_100 Linear	27,3	2,68	8,5	0,9870	1,25
ExtraTrees Linear	28,9	2,82	9,1	0,9854	1,30
GBR_100 Linear	29,5	3,04	10,2	0,9847	1,22

Fonte: Autor (2026).

De forma geral, os resultados indicam que abordagens que combinam modelagem não linear e métodos de ensemble apresentam melhor capacidade de previsão para o problema de estimativa de peso baseado em sinais ópticos.

Após a etapa de validação cruzada LORO, os modelos que apresentaram melhor desempenho foram selecionados para uma etapa adicional de validação externa, com o objetivo de avaliar a capacidade de generalização da modelagem em condições não utilizadas durante o treinamento. Para essa análise, foram empregadas cargas de 650 kgf, 850 kgf e 1250 kgf, que não haviam sido utilizadas diretamente no processo de ajuste dos modelos.

Os resultados dessa validação são apresentados na Tabela 14. De forma geral, observa-se que os modelos mantiveram desempenho consistente mesmo diante de dados completamente novos, indicando boa capacidade de extrapolação dentro da faixa analisada. O modelo *GBR<sub>50</sub>Poly2* apresentou o menor erro absoluto médio na validação externa, com MAE de 105,0 kgf, seguido do modelo *RidgePoly2*, com MAE de 108,3 kgf, enquanto o modelo *AdaBoostPoly2* apresentou MAE de 116,7 kgf.

Tabela 9 – Validação externa utilizando cargas não empregadas no ajuste principal.

<b>Modelo</b>	<b>MAE Ext (kgf)</b>	<b>MaxErr Ext (kgf)</b>	<b>Pior Caso</b>
Ridge Poly2	108,3	151,7	1250→1101 kgf (12,1%)
AdaBoost Poly2	116,7	200,0	650→800 kgf (23,1%)
GBR_50 Poly2	105,0	145,0	1250→1105 kgf (11,6%)

Fonte: Autor (2026).

De modo geral, os resultados da validação externa confirmam que os modelos selecionados na etapa LORO mantêm desempenho satisfatório quando aplicados a dados não utilizados no treinamento. Entre eles, o modelo *GBR<sub>50</sub>Poly2* demonstrou o melhor compromisso entre erro médio e erro máximo, indicando maior robustez para a tarefa de estimativa de peso baseada nas características extraídas do sinal óptico. Entretanto, observa-se que os erros obtidos para os modelos *RidgePoly2* e *GBR<sub>50</sub>Poly2* foram bastante próximos. Dessa forma, para uma comparação mais criteriosa entre os modelos candidatos, foi realizada uma análise adicional baseada em uma pontuação metrológica composta. A Tabela 10 apresenta a pontuação metrológica composta utilizada para comparar os modelos testados, considerando simultaneamente erro máximo, coeficiente de determinação, consistência entre validações, estabilidade e interpretabilidade.

Tabela 10 – Pontuação metrológica composta utilizada para comparação entre os modelos candidatos.

<b>Modelo</b>	<b>Score</b>	<b>Erro Máximo(%)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Consistência</b>	<b>Equação</b>
Ridge Poly2	-14,52	7,6	0,9917	0,96	SIM
GBR_50 Poly2	-19,94	7,2	0,9832	0,93	não
BayesianRidge Poly2	-14,35	7,7	0,9916	0,97	SIM
ElasticNet Poly2	-14,10	7,8	0,9910	0,96	SIM
Linear Poly2	-14,08	7,4	0,9916	0,98	SIM
AdaBoost Poly2	-13,20	10,0	0,9827	1,01	não

Fonte: Autor (2026).

Observa-se que o modelo *Ridge Poly2* apresentou o melhor equilíbrio entre esses critérios, com elevado valor de  $R^2$ , baixo erro máximo e possibilidade de obtenção de equação

fechada. Embora alguns modelos tenham apresentado desempenho competitivo em métricas específicas, a ausência de interpretabilidade e o comportamento menos robusto em validações externas justificaram a escolha do *Ridge Poly2* como modelagem mais adequada para a curva de calibração do sensor.

### 5.2.2.2 Curva de calibração e desempenho do modelo *Ridge Poly2*

Após a etapa de comparação entre diferentes estratégias de modelagem, o modelo Multi-sensor *Poly2 + Ridge* foi selecionado como a alternativa mais adequada para representar a curva de calibração do sensor. Essa escolha foi motivada pelo equilíbrio entre desempenho preditivo, consistência entre ensaios, baixo erro máximo e, principalmente, pela possibilidade de obtenção de uma equação fechada e auditável, característica importante do ponto de vista metrológico. A decisão foi sustentada pelos resultados apresentados na Tabela 11 que contém as métricas do modelo, na qual se observou desempenho compatível com os requisitos de calibração e boa capacidade de generalização.

Tabela 11 – Métricas do modelo *Multi Poly2 + Ridge* utilizando quatro FBGs.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Modelo	Multi Poly2 + Ridge (4 FBGs)
Dados de treino	3289 leituras individuais
$R^2$ (calibração)	0,9336
MAE calibração (médias)	26,9 kgf
Erro % médio (médias)	2,52%
Erro % máximo (médias)	4,92%
MAE LORO CV	37,6 kgf
Erro % médio LORO CV	3,81%
Faixa calibrada	500 – 1500 kgf

Fonte: Autor (2026).

A construção do modelo foi realizada a partir dos dados experimentais obtidos nos ensaios controlados em laboratório, reunidos na tabela com os dados de calibração. Nessa etapa, foram considerados os sinais provenientes de múltiplas grades de Bragg, permitindo explorar de forma mais completa a resposta global do sistema sensor. A modelagem adotada combinou expansão polinomial de segunda ordem com regularização Ridge, de modo a incorporar não apenas os efeitos lineares das variáveis de entrada, mas também termos quadráticos e de interação entre sensores. Essa abordagem foi importante para descrever adequadamente a natureza não

estritamente linear da relação entre deformação e carga aplicada.

A construção do modelo foi realizada a partir dos dados experimentais obtidos nos ensaios controlados em laboratório, reunidos na Tabela 12 com os resultados individuais da calibração pelo modelo *Ridge Poly2*.

Tabela 12 – Dados experimentais e resultados de predição do modelo.

<b>Carga Real (kgf)</b>	<b>Rep</b>	<b>FBG_0 (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>FBG_6 (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>FBG_3 (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>FBG_8 (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>Carga Predita (kgf)</b>	<b>Erro (kgf)</b>	<b>Erro (%)</b>
500	4	-15,6659	202,7100	421,6387	-135,8726	493,7	-6,3	-1,26
500	5	-14,4370	206,2052	432,0587	-131,6640	524,5	+24,5	+4,91
500	6	-14,7633	207,1182	427,9049	-134,5079	515,9	+15,9	+3,19
600	1	-13,5080	218,0097	446,2613	-130,7768	594,4	-5,6	-0,94
600	2	-18,7453	209,9157	449,4287	-129,8746	580,4	-19,6	-3,27
600	3	-15,6035	215,0446	457,1970	-124,7656	614,0	+14,0	+2,33
700	1	-20,3398	215,3056	465,8251	-133,9330	666,8	-33,2	-4,75
700	2	-20,1707	218,6174	475,6940	-131,8921	719,1	+19,1	+2,73
700	3	-22,5781	216,8150	480,1865	-130,6742	729,8	+29,8	+4,26
800	1	-19,3597	221,7033	491,4765	-137,9922	836,5	+36,5	+4,56
800	2	-23,5598	219,3359	493,0129	-134,7973	825,7	+25,7	+3,21
800	3	-22,8750	221,0363	496,9339	-132,5416	845,9	+45,9	+5,74
900	1	-21,2351	227,0317	505,9143	-136,8971	955,8	+55,8	+6,20
900	2	-21,3825	226,9411	505,3382	-135,0996	942,5	+42,5	+4,72
900	3	-24,6934	222,6603	501,4845	-132,4819	884,9	-15,1	-1,67
1000	1	-25,2590	232,5636	508,9098	-142,5877	1052,8	+52,8	+5,28
1000	2	-28,5083	228,1346	512,1109	-138,0438	1028,2	+28,2	+2,82
1000	3	-26,2685	232,4337	516,7094	-135,1643	1068,3	+68,3	+6,83
1100	1	-24,5060	234,8410	522,3221	-140,4387	1156,5	+56,5	+5,14
1100	2	-29,4682	231,9115	518,0587	-140,4744	1115,9	+15,9	+1,44
1100	3	-30,5250	232,8490	519,3733	-138,3160	1121,7	+21,7	+1,97
1200	1	-34,1910	233,2891	521,4641	-148,3030	1218,7	+18,7	+1,55
1200	2	-31,5534	235,9999	525,3923	-141,8733	1219,8	+19,8	+1,65
1200	3	-29,1283	237,1086	526,0340	-140,1690	1214,7	+14,7	+1,23
1300	1	-31,4258	237,5080	528,7724	-144,5409	1278,6	-21,4	-1,65
1300	2	-34,9691	236,0798	526,8201	-145,6926	1269,9	-30,1	-2,31
1300	3	-35,4167	236,2426	528,5254	-141,9827	1260,3	-39,7	-3,05
1400	1	-37,0275	236,8072	530,0779	-148,7697	1333,9	-66,1	-4,72
1400	2	-38,0725	237,9717	532,6442	-145,6291	1346,1	-53,9	-3,85
1400	3	-36,0588	239,6867	537,5513	-143,8831	1380,6	-19,4	-1,39
1500	1	-37,5138	241,4048	538,8883	-149,2387	1459,8	-40,2	-2,68
1500	2	-39,5842	238,3752	540,5651	-146,8374	1437,8	-62,2	-4,15
1500	3	-41,6993	234,7516	536,8435	-148,4137	1392,7	-107,3	-7,16

Fonte: Autor (2026).

Na Tabela 12 são apresentados, para cada ensaio, a carga real aplicada, a repetição correspondente, as respostas medidas pelas grades de Bragg de 815 nm, 860 nm, 835 nm e 870

nm, a carga predita pelo modelo, bem como os erros absoluto e percentual associados. Essa organização permite analisar o comportamento do modelo ponto a ponto, evidenciando sua capacidade de estimar a carga a partir das leituras multissensoriais de deformação ao longo de toda a faixa investigada, entre 500 e 1500 kgf.

A análise desses resultados individuais mostra que o modelo reproduz satisfatoriamente a tendência global dos ensaios, ainda que apresente variações locais entre repetições, como esperado em dados experimentais reais. Em cargas mais baixas, os erros individuais tendem a permanecer reduzidos, enquanto em algumas condições intermediárias e elevadas surgem dispersões mais perceptíveis, porém sem comprometer a coerência geral da resposta predita. Essa tabela é importante porque mostra que a qualidade do ajuste não decorre apenas de médias agregadas, mas também de um desempenho consistente nas observações individuais utilizadas na calibração.

A partir desses resultados detalhados, foi construída a Tabela 13 que mostra as médias por nível de carga, na qual os valores preditos são agrupados por nível de carregamento, permitindo visualizar de forma mais clara a resposta média do modelo em cada ponto da curva. A Tabela 13 constitui a base resumida da calibração, pois consolida, para cada carga aplicada, o comportamento médio do sistema, reduzindo o efeito de flutuações pontuais observadas nas repetições individuais. Com isso, torna-se possível analisar de maneira mais direta a aderência entre a carga real e a carga estimada pelo modelo selecionado.

Tabela 13 – Médias por nível de carga utilizadas na curva de calibração do modelo Ridge Poly2.

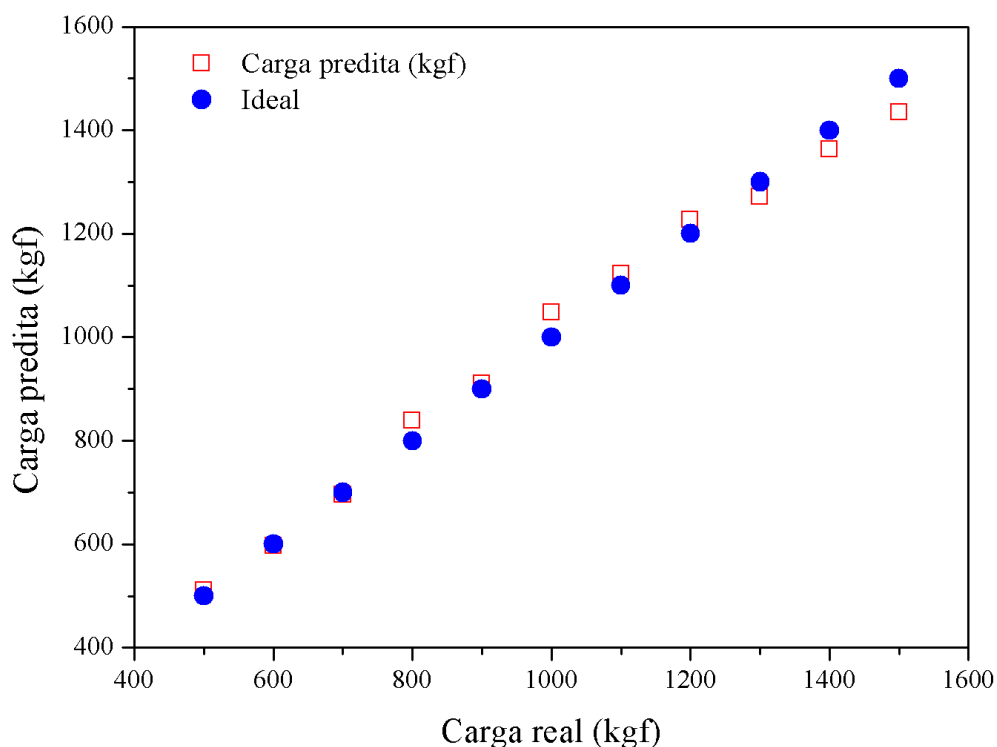
<b>Carga Real (kgf)</b>	<b>Deformação (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>Carga Predita (kgf)</b>	<b>Erro (kgf)</b>	<b>Erro (%)</b>	<b>Linha Ideal</b>
500	427,85	511,7	+11,7	+2,33	500
600	450,56	596,8	-3,2	-0,53	600
700	472,05	695,8	-4,2	-0,60	700
800	493,80	839,3	+39,3	+4,92	800
900	502,97	909,7	+9,7	+1,08	900
1000	512,34	1047,4	+47,4	+4,74	1000
1100	519,36	1122,8	+22,8	+2,07	1100
1200	524,40	1226,9	+26,9	+2,24	1200
1300	528,25	1271,6	-28,4	-2,19	1300
1400	534,27	1363,6	-36,4	-2,60	1400
1500	539,26	1434,1	-65,9	-4,39	1500

Fonte: Autor (2026).

A Figura 36 apresenta a curva de calibração obtida a partir das médias por nível de carga, comparando os valores reais aplicados ao sistema com as cargas preditas pelo modelo

*Ridge Poly2*. Observa-se que os pontos estimados permanecem próximos da linha ideal ao longo de toda a faixa analisada, indicando boa concordância entre os valores experimentais e os valores calculados pelo modelo.

Figura 36 – Comparação entre os valores de carga predita pelo modelo *Ridge Poly2* e os valores ideais de referência em função da carga real aplicada.



Fonte: Autor (2026).

De modo geral, verifica-se que o modelo acompanhou adequadamente a tendência linear crescente da resposta do sensor, com pequenas discrepâncias pontuais em alguns níveis de carga, especialmente nas extremidades superiores da faixa de operação. Ainda assim, a proximidade entre os pontos preditos e os pontos ideais confirma a capacidade do modelo em representar o comportamento médio do sistema de forma satisfatória. Esse resultado reforça que a estratégia de calibração adotada, baseada nas médias experimentais e na regressão Ridge com expansão polinomial de segunda ordem, foi adequada para descrever a relação entre os sinais dos sensores e a carga aplicada.

Os resultados da Figura 36 foram obtidos a partir da Tabela 13 e mostra que o modelo *Ridge Poly2* foi capaz de acompanhar de forma satisfatória a tendência crescente da resposta do sensor ao longo da faixa de operação, mantendo previsões próximas dos valores reais e erros

relativamente baixos na maior parte do intervalo investigado. Embora, nos testes controlados em laboratório, a carga tenha sido aplicada sempre na região correspondente à grade de Bragg centrada em aproximadamente 835 nm, justificando a maior sensibilidade observada para esta grade, a modelagem multissensor mostrou-se mais vantajosa, pois incorporou também os sinais de outras grades, tornando a estimativa final mais robusta.

A capacidade de generalização do modelo foi ainda avaliada por meio da Tabela 14 que mostra a validação externa com 3 pontos independentes, construída a partir de cargas não empregadas diretamente no ajuste principal. Os resultados mostram que, embora a precisão diminua em relação aos pontos pertencentes à calibração, o modelo preserva a tendência física esperada e fornece estimativas compatíveis com a resposta experimental do sensor.

Tabela 14 – Validação externa com 3 pontos independentes.

<b>Carga Real (kgf)</b>	<b>Deformação (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>Carga Predita (kgf)</b>	<b>Erro (kgf)</b>	<b>Erro (%)</b>
650	481,41	640,0	-10,0	-1,55
850	500,29	799,0	-51,0	-6,00
1250	516,47	1150,1	-99,9	-7,99

Fonte: Autor (2026).

A partir da Tabela 13 foi realizada uma análise do erro percentual da calibração ao longo da faixa de carga. A Figura 37 apresenta o erro percentual da calibração por nível de carga, calculado a partir da diferença entre a carga real aplicada e a carga predita pelo modelo *Ridge Poly2*, utilizando os valores médios da curva de calibração. Esse gráfico permite avaliar, de forma direta, como o desempenho do modelo varia ao longo da faixa de operação investigada.

Figura 37 – Erro percentual da calibração por nível de carga para o modelo *Ridge Poly2*.



Fonte: Autor (2026).

Observa-se que os erros percentuais permaneceram relativamente baixos em toda a faixa analisada, mantendo-se dentro de aproximadamente  $\pm 5\%$ . Nas cargas de 500 kgf, 800 kgf, 900 kgf, 1000 kgf, 1100 kgf e 1200 kgf, os erros foram positivos, indicando que o modelo apresentou superestimação da carga nesses pontos. Entre esses níveis, os maiores desvios positivos ocorreram em 800 kgf e 1000 kgf, com valores próximos de 4,92% e 4,74%, respectivamente.

Por outro lado, nas cargas de 600 kgf, 700 kgf, 1300 kgf, 1400 kgf e 1500 kgf, os erros foram negativos, o que indica subestimação da carga pelo modelo. Esse comportamento torna-se mais evidente nas cargas mais elevadas, especialmente em 1500 kgf, para a qual foi observado o maior erro negativo da calibração, de aproximadamente (-4,39%).

De modo geral, o gráfico mostra que o modelo *Ridge Poly2* apresentou uma oscilação controlada do erro ao longo da faixa de operação, sem desvios abruptos ou perda de coerência física. Nota-se uma tendência de superestimação em parte da região intermediária da curva e de subestimação nas cargas mais elevadas, sugerindo uma leve mudança de comportamento do ajuste nas extremidades superiores da faixa de calibração. Ainda assim, os resultados permanecem dentro de limites compatíveis com uma calibração experimental de boa qualidade, reforçando a adequação do modelo para a estimativa de carga a partir das deformações medidas pelas grades de Bragg.

Adicionalmente, a interpretação interna da modelagem pode ser aprofundada por meio das tabelas que detalham as componentes da equação para cada ponto de calibração, incluindo a contribuição de cada termo linear, quadrático e dos termos de interação cruzada entre sensores. Essas tabelas, por apresentarem um detalhamento mais extenso, são disponibilizadas nos Anexos desta tese. Tal decomposição reforça a rastreabilidade da modelagem adotada e evidencia que a carga predita resulta da combinação ponderada entre múltiplos efeitos capturados pelas leituras das grades de Bragg.

### 5.2.3 Testes de campo estáticos e supervisionados

Os testes estáticos supervisionados em campo permitiram avaliar a resposta do protótipo de pesagem óptica sob carregamentos reais aplicados por veículos pesados de diferentes massas. Mesmo com a limitação instrumental imposta pela operação exclusiva da FBG 0 de 815 nm, os ensaios forneceram evidências importantes sobre a sensibilidade do sistema, a repetibilidade das medições e a relação entre deformação óptica e carga aplicada. Conforme registrado no relatório experimental, os testes foram realizados com três veículos de massas distintas: 3500 kg, 4090 kg e 4890 kg, o que possibilitou investigar o comportamento do sensor em diferentes níveis de solicitação mecânica.

De modo geral, os sinais adquiridos apresentaram comportamento recorrente, caracterizado pela ocorrência de um pico inicial de deformação seguido por uma estabilização em valor inferior, em alguns casos até mesmo negativo. Esse padrão foi observado para os diferentes veículos e configurações de aquisição e pode estar associado a fatores como histerese da borracha dos pneus, pequenas variações de posicionamento sobre o ponto sensível e parâmetros de compensação do *software* de aquisição *BraggSens*.

Foi realizada uma análise baseada na média dos picos de deformação obtidos em todos os testes realizados para cada caminhão. Essa abordagem permitiu avaliar de forma mais abrangente o comportamento estrutural de cada modelo de veículo, considerando as variações observadas ao longo de múltiplos ensaios. Dessa forma, tornou-se possível obter uma estimativa mais representativa do desempenho médio de cada caminhão em termos de deformação registrada pelo sistema de medição.

A Tabela 15 apresenta uma análise comparativa entre os três caminhões utilizados nos testes conduzidos em ambiente relevante, de modo que a média dos valores de deformação para cada caminhão é fundamental por diversas razões. Entre elas, destaca-se o aumento da

precisão dos resultados, uma vez que a consideração da média de múltiplos testes reduz a influência de variações pontuais e de ruídos eventualmente presentes em medições individuais. Como consequência, obtém-se uma avaliação mais robusta e confiável do comportamento do sistema analisado.

Tabela 15 – Média total de deformação por veículo, peso de referência, valor estimado pela lei de formação e erro percentual absoluto.

<b>Veículo</b>	<b>Deformação média total (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Real</b>	<b>Peso aferido (kg)</b>	<b>Erro percentual absoluto (%)</b>
Volkswagen Worker 6.160	961,218	4090		3946,109	3,518
Volkswagen Worker 8.120	800,164	3500		3606,865	3,053
Iveco Daily com baú	1426,863	4890		4926,943	0,755

Fonte: Autor (2026).

A deformação média registrada para cada caminhão evidencia diferenças significativas entre os modelos analisados. Essas variações são esperadas, uma vez que cada veículo possui massa distinta, fator que influencia diretamente a deformação medida pelo sistema sensor. De modo geral, observa-se que caminhões com maior peso tendem a produzir maiores níveis de deformação, o que está de acordo com o comportamento mecânico esperado para estruturas submetidas a cargas.

Como exemplo, o Iveco *Daily* com baú, da linha Daily Chassi-Cabine/Furgão de carga, apresentou a maior média de deformação registrada, sendo também o veículo de maior massa entre os avaliados, com peso medido de 4890 kg. Em contrapartida, o *Volkswagen Worker* 8.120 adaptado com plataforma de reboque apresentou a menor média de deformação, correspondendo igualmente ao menor peso entre os veículos analisados, com massa de aproximadamente 3500 kg. Essa relação direta entre o peso do caminhão e a deformação medida é consistente com os fundamentos teóricos da mecânica dos materiais, uma vez que o aumento da carga aplicada tende a produzir maiores níveis de deformação no sensor baseado em grade de Bragg em fibra óptica.

A equação empregada para a estimativa do peso dos caminhões, baseada nas deformações medidas, foi comparada com os valores de peso tabelados para cada modelo de veículo. Os resultados indicam que os valores estimados por meio da lei de formação, dada pela Equação 5.8, apresentam boa aproximação em relação aos pesos tabelados, embora sejam observadas algumas discrepâncias.

Entre os veículos analisados, o Iveco *Daily* com baú, carga, apresentou o menor erro percentual absoluto, de 0,755%, indicando que, para esse caso, a deformação medida apresentou

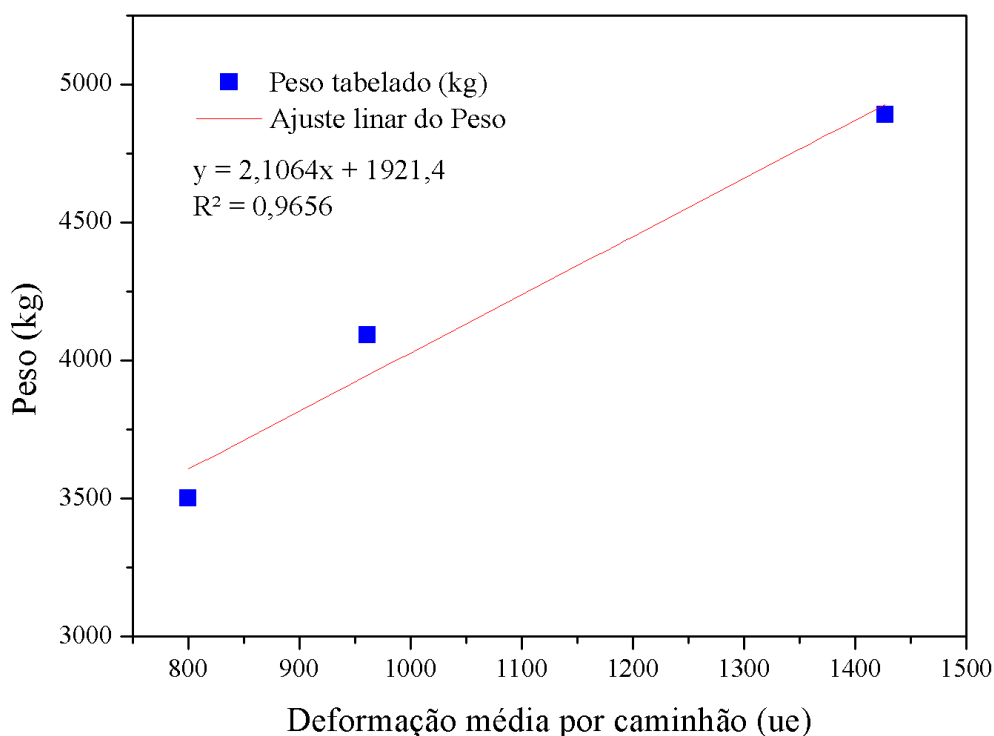
elevada correlação com o peso real do veículo. Por outro lado, os caminhões *Volkswagen Worker* 6.160 e *Volkswagen Worker* 8.120 adaptado com plataforma de reboque apresentaram erros percentuais de 3,518% e 3,053%, respectivamente, sugerindo que a lei de formação apresenta menor precisão para esses modelos específicos.

Esses resultados indicam que, embora a lei de formação constitua uma ferramenta eficaz para estimativa de peso a partir de deformações medidas, sua precisão pode variar em função das características particulares de cada veículo, tais como massa total, geometria estrutural e distribuição da carga.

Adicionalmente, observa-se que a Equação 5.8 utilizada como lei de formação tende a apresentar melhor desempenho em condições de cargas mais elevadas. Em situações com maior peso aplicado, a magnitude da deformação registrada tende a ser superior, o que favorece uma relação mais linear entre carga e deformação e reduz a influência relativa de pequenas variações ou incertezas nas medições. Em sistemas físicos, estruturas submetidas a cargas mais elevadas frequentemente apresentam respostas mecânicas mais previsíveis, nas quais imperfeições ou ruídos experimentais possuem impacto proporcionalmente menor. Dessa forma, a aplicação da lei de formação em cenários envolvendo cargas mais elevadas pode resultar em estimativas mais precisas e com maior capacidade de generalização.

O gráfico da Figura 38 apresenta a relação entre a deformação média medida para cada caminhão e o respectivo peso tabelado de referência, permitindo avaliar a coerência entre a resposta do sistema sensor e a carga aplicada por diferentes veículos. Nesse tipo de representação, cada ponto experimental corresponde a um caminhão ensaiado, relacionando-se a média total de deformação obtida durante sua passagem com o peso informado como referência. Além disso, foi traçada uma reta de ajuste linear com o objetivo de verificar a tendência de crescimento da resposta do sensor em função do aumento da carga.

Figura 38 – Relação entre a deformação média por caminhão e o peso de referência dos veículos, com ajuste linear dos dados experimentais.



Fonte: Autor (2026).

Observa-se, a partir do gráfico, que há uma tendência aproximadamente linear entre a deformação média por caminhão e o peso correspondente, indicando que maiores cargas produzem maiores níveis médios de deformação no sistema monitorado. A equação do ajuste linear, pe dada por:

$$y = 2,1064x + 1921,4. \quad (5.8)$$

A Equação 5.8 mostra que o peso estimado cresce proporcionalmente com a deformação média registrada. O coeficiente de determinação,  $R^2 = 0,9656$ , indica um elevado grau de ajuste dos dados ao modelo linear, sugerindo que a deformação média é uma variável fortemente correlacionada com o peso dos veículos avaliados.

Esse comportamento é relevante porque confirma, ainda que com um conjunto reduzido de veículos, que a resposta do sensor apresenta sensibilidade consistente ao carregamento mecânico imposto. Em termos práticos, o resultado reforça o potencial de utilização da deformação média como parâmetro representativo para estimativa de carga veicular, especialmente

em etapas preliminares de calibração e validação. Além disso, a proximidade dos pontos experimentais em relação à reta ajustada sugere boa compatibilidade entre os valores medidos e a tendência prevista pelo modelo, com desvios relativamente pequenos.

Na segunda etapa, a análise deixou de considerar apenas a média global de cada caminhão e passou a observar cada teste de repetibilidade individualmente. Para isso, em cada passagem do veículo sobre a FBG, foram identificados dois picos de deformação, denominados Pico 1 e Pico 2, associados às rodas dianteira e traseira. Em seguida, a equação de ajuste linear apresentada na Figura 38 foi aplicada separadamente a cada pico e também à média dos dois picos, permitindo estimar o peso correspondente em cada teste e calcular o erro percentual absoluto de cada situação.

Essa abordagem teve como objetivo avaliar a repetibilidade das medições e verificar como a resposta do sensor variava entre diferentes passagens, lados do caminhão e condições de posicionamento. O relatório mostra que houve variações significativas entre os valores de Pico 1 e Pico 2, bem como entre os lados esquerdo e direito, indicando que fatores como distribuição de carga, pressão dos pneus e não centralização do pneu sobre a FBG influenciaram diretamente os resultados. No caso do caminhão Atlanta, por exemplo, a discrepância entre os erros dos dois picos em um mesmo teste evidenciou que a lei de formação não mantinha a mesma precisão em todas as condições experimentais.

As Tabelas 16, 17 e 18 apresentam a aplicação individual da lei de formação em cada teste de repetibilidade realizado com os três veículos avaliados: Iveco Daily com baú, Volkswagen Worker 8.120 e Volkswagen Worker 6.160. Em cada tabela, são mostrados os valores de Pico 1 e Pico 2 de deformação, os respectivos valores de peso estimado obtidos pela aplicação da lei de formação, os erros percentuais absolutos associados a cada pico, bem como a média entre os dois picos, também convertida em peso estimado e comparada com o valor real do veículo.

A Tabela 16, referente ao veículo Iveco *Daily* com baú, evidencia uma maior dispersão entre os resultados dos picos individuais, com erros percentuais que, em alguns casos, atingem valores mais elevados, especialmente quando analisados separadamente. Foram realizados quatro testes e para cada teste foi empregado o lado esquerdo (E) e direito (D) do veículo. Observa-se que a utilização da média entre Pico 1 e Pico 2 tende a reduzir parcialmente essa variabilidade, embora ainda permaneçam erros relativamente expressivos em alguns testes. Esse comportamento sugere que, para esse veículo, a resposta do sensor foi mais sensível a

fatores como distribuição não uniforme de carga, posicionamento do veículo sobre a região instrumentada e diferenças entre os lados esquerdo e direito.

Tabela 16 – Aplicação da lei de formação aplicada individualmente para cada teste de repetibilidade referente ao veículo *Iveco Daily com baú*.

Iveco Daily com baú									
	Pico 1 ( $\mu\epsilon$ )	Lei de formação	Erro Percentual Absoluto (%)	Pico 2 ( $\mu\epsilon$ )	Lei de formação	Erro Percentual Absoluto (%)	Média pico 1 e 2 ( $\mu\epsilon$ )	Lei de formação	Erro Percentual Absoluto (%)
1º Teste (E)	753,570	3508,720	28,25	1330,270	4723,481	3,41	1041,920	4116,100	15,83
1º Teste (D)	1705,230	5513,296	12,75	1920,700	5967,162	22,03	1812,965	5740,229	17,39
2º Teste (E)	958,980	3941,395	19,40	1214,350	4479,307	8,40	1086,665	4210,351	13,90
2º Teste (D)	1441,240	4957,228	1,37	2000,790	6135,864	25,48	1721,015	5546,546	13,43
3º Teste (E)	898,790	3814,611	21,99	1231,700	4515,853	7,65	1065,245	4165,232	14,82
3º Teste (D)	1578,050	5245,405	7,27	1964,990	6060,455	23,94	1771,520	5652,930	15,60
4º Teste (E)	1284,440	4626,944	5,38	1438,670	4951,814	1,26	1361,555	4789,379	2,06
4º Teste (D)	1434,040	4942,062	1,06	1673,990	5447,493	11,40	1554,015	5194,777	6,23

Fonte: Autor (2026).

A Tabela 17, correspondente ao veículo *Volkswagen Worker 8.120*, apresenta resultados mais homogêneos, com erros percentuais absolutos geralmente menores do que os observados para o *Iveco Daily com baú*. Nota-se que tanto os valores individuais dos picos quanto a média entre eles produziram estimativas mais próximas do peso real, indicando maior estabilidade experimental. Esse resultado sugere que esse veículo apresentou uma distribuição de carga mais uniforme durante os ensaios, favorecendo a repetibilidade das medições e a aplicação da lei de formação com maior confiabilidade.

Tabela 17 – Aplicação da lei de formação aplicada individualmente para cada teste de repetibilidade referente ao veículo *Volkswagen Worker 8.120*.

Volkswagen Worker 8.120									
	Pico 1 ( $\mu\epsilon$ )	Lei de formação	Erro Percentual Absoluto (%)	Pico 2 ( $\mu\epsilon$ )	Lei de formação	Erro Percentual Absoluto (%)	Média pico 1 e 2 ( $\mu\epsilon$ )	Lei de formação	Erro Percentual Absoluto (%)
1º Teste (E)	644,270	3278,490	6,33	954,560	3932,085	12,35	799,415	3605,2878	3,01
1º Teste (D)	D86,800	3578,716	2,25	909,620	3837,424	9,64	848,210	3708,0695	5,94
2º Teste (E)	760,000	3522,264	0,64	917,900	3854,865	10,14	838,950	3688,5643	5,39
2º Teste (D)	751,300	3503,938	0,11	728,980	3456,923	1,23	740,140	3480,4309	0,56
3º Teste (D)	766,470	3535,892	1,03	781,740	3568,057	1,94	774,105	3551,9748	1,48

Fonte: Autor (2026).

Já a Tabela 18, referente ao veículo *Volkswagen Worker 6.160*, mostra um comportamento intermediário entre os dois casos anteriores. Em vários testes, os erros associados à média dos picos foram reduzidos em relação aos erros obtidos individualmente para Pico 1 e Pico 2, evidenciando que a média funciona como uma estratégia de suavização das oscilações do sinal. Ainda assim, permanecem diferenças perceptíveis entre alguns ensaios, o que indica que a resposta do sensor também foi influenciada pelas condições específicas de carregamento e posicionamento do veículo.

Tabela 18 – Aplicação da lei de formação aplicada individualmente para cada teste de repetibilidade referente ao veículo *Volkswagen Worker 6.160*.

Volkswagen Worker 6.160									
	Pico 1 ( $\mu\epsilon$ )	Lei de formação	Erro Percentual Absoluto (%)	Pico 2 ( $\mu\epsilon$ )	Lei de formação	Erro Percentual Absoluto (%)	Média pico 1 e 2 ( $\mu\epsilon$ )	Lei de formação	Erro Percentual Absoluto (%)
1° Teste (E)	994,800	4016,847	1,8	1166,570	4378,663	7,06	1080,685	4197,755	2,63
1° Teste (D)	976,500	3978,300	2,7	933,620	3887,977	4,94	955,060	3933,138	3,84
2° Teste (E)	907,110	3832,137	6,3	994,920	4017,099	1,78	951,015	3924,618	4,04
2° Teste (D)	890,250	3796,623	7,2	976,740	3978,805	2,72	933,495	3887,714	4,95
3° Teste (E)	700,950	3397,881	16,9	944,480	3910,853	4,38	822,715	3654,367	10,65
3° Teste (D)	943,180	3908,114	4,4	997,590	4022,724	1,64	970,385	3965,419	3,05
4° Teste (E)	875,300	3765,132	7,9	907,060	3832,031	6,31	891,180	3798,582	7,13
4° Teste (D)	985,970	3998,247	2,2	828,740	3667,058	10,34	907,355	3832,653	6,29
5° Teste (E)	983,890	3993,866	2,4	1293,030	4645,038	13,57	1138,460	4319,452	5,61
5° Teste (D)	1022,910	4076,058	0,3	900,740	3818,719	6,63	961,825	3947,388	3,49

Fonte: Autor (2026).

De forma geral, as três tabelas mostram que a análise individual de cada teste de repetibilidade permitiu verificar que a aplicação da mesma lei de formação não produz exatamente o mesmo desempenho para todos os veículos e todas as passagens. Os resultados indicam que a média entre os dois picos de deformação tende a fornecer estimativas mais estáveis do que a utilização de apenas um pico isolado, uma vez que reduz os efeitos de flutuações locais e discrepâncias entre eixos ou lados do veículo. Assim, essas tabelas são importantes porque evidenciam, de forma detalhada, a variabilidade experimental, a repetibilidade do sistema e os limites da calibração quando aplicada individualmente a cada ensaio.

Na terceira etapa da análise, os resultados passaram a ser avaliados com base na soma da deformação obtida nos dois lados do veículo, buscando uma representação mais abrangente da resposta estrutural causada pela carga aplicada. Diferentemente da análise anterior, em que cada teste de repetibilidade foi interpretado de forma isolada a partir dos picos individuais, nesta abordagem considerou-se inicialmente a soma dos picos correspondentes aos dois eixos em cada lado do veículo. Em seguida, os valores obtidos para os lados esquerdo e direito foram somados, gerando uma grandeza única associada à resposta global do veículo sobre a região instrumentada.

As Tabelas 19, 20, 21 e 22 apresentam os resultados dessa abordagem para os três veículos avaliados: *Iveco Daily* com baú, *Volkswagen Worker 8.120* e *Volkswagen Worker 6.160*, respectivamente. Em cada tabela, são mostrados os valores dos picos de deformação dos dois eixos, a soma entre esses picos em cada lado, a soma total entre esquerda e direita, o valor estimado de massa obtido pela aplicação da nova lei de formação e o respectivo erro percentual.

As Tabelas 19 e 20, referente ao *Iveco Daily* com baú, mostram que os valores de soma entre os lados apresentaram maior dispersão entre os ensaios, refletindo a variabilidade já observada nas análises anteriores para esse veículo, de modo que nos ensaios da Tabela 19 foi

utilizado um tempo de integração de 15 ms e nos da Tabela 20 um tempo de integração de 100 ms. Mesmo assim, a aplicação da lei de formação baseada na soma das deformações permitiu obter estimativas coerentes com a massa real do veículo. Observa-se que os erros percentuais variaram entre os testes, mas a média final apresentou valor estimado de 4887,125305 kg, com erro de apenas 0,06%, indicando excelente concordância global quando se considera o conjunto dos ensaios em vez de cada medição isolada.

Tabela 19 – Análise da soma dos lados do veículo *Iveco Daily com baú* para tempo de integração de 15 ms.

Testes	Pico Eixo 1	Pico Eixo 2	Soma pico 1 e 2	Soma		Lei de formação (kg)	Erro (%)
	( $\mu\epsilon$ )	( $\mu\epsilon$ )	( $\mu\epsilon$ )	Esquerda	Direita		
1º Teste (D) 15 ms	1896,35	2222,92	4119,27	6701,4545	5145,516599	5,23	
1º Teste (E) 15 ms	1009,0045	1573,18	2582,1845				
2º Teste (D) 15 ms	1981,47	2159,70	4141,17	6841,5493	5205,869438	6,46	
2º Teste (E) 15 ms	1014,9293	1685,45	2700,3793				
3º Teste (D) 15 ms	1416,3873	1707,72	3124,1073	6489,5373	5054,222669	3,36	
3º Teste (E) 15 ms	1521,60	1843,83	3365,43				
4º Teste (D) 15 ms	1127,7126	1808,08	2935,7926	6158,4926	4911,608612	0,44	
4º Teste (E) 15 ms	1367,42	1855,28	3222,70				
5º Teste (D) 15 ms	1183,44	1602,63	2786,07	5894,11	4797,712588	1,89	
5º Teste (E) 15 ms	1193,72	1914,32	3108,04				
<b>Média</b>			<b>3108,51474</b>	<b>6417,02874</b>	<b>5022,985181</b>	<b>3,48</b>	

Fonte: Autor (2026).

Tabela 20 – Análise da soma dos lados do veículo *Iveco Daily com baú* para tempo de integração de 100 ms.

Testes	Pico Eixo 1	Pico Eixo 2	Soma pico 1 e 2	Soma		Lei de formação (kg)	Erro (%)
	( $\mu\epsilon$ )	( $\mu\epsilon$ )	( $\mu\epsilon$ )	Esquerda	Direita		
1º Teste (D) 100 ms	753,57	1330,27	2083,84	5709,77	4718,298916	3,51	
1º Teste (E) 100 ms	1705,23	1920,70	3625,93				
2º Teste (D) 100 ms	958,98	1214,35	2173,33	5615,36	4677,627088	4,34	
2º Teste (E) 100 ms	1441,24	2000,79	3442,03				
3º Teste (D) 100 ms	898,79	1231,70	2130,49	5673,53	4702,686724	3,83	
3º Teste (E) 100 ms	1578,05	1964,99	3543,04				
4º Teste (D) 100 ms	1284,44	1438,67	2723,11	5831,14	4770,585112	2,44	
4º Teste (E) 100 ms	1434,04	1673,99	3108,03				
<b>Média</b>			<b>2853,215</b>	<b>5707,45</b>	<b>4717,29946</b>	<b>3,53</b>	

Fonte: Autor (2026).

A diferença entre os testes apresentados em cada tabela está no tempo de integração configurado previamente no *software BraggSens* antes da realização dos ensaios. Em uma condição experimental, os dados foram adquiridos com tempo de integração de 15 ms, enquanto na outra configuração utilizou-se 100 ms. Assim, o objetivo dessa variação foi avaliar como diferentes tempos de integração influenciam a resposta do sistema de aquisição e, consequentemente,

os valores de deformação registrados durante os testes.

De forma geral, o tempo de integração está relacionado ao intervalo utilizado pelo interrogador para coletar e processar o sinal óptico proveniente da grade de Bragg. Um tempo de integração menor, como 15 ms, tende a proporcionar uma aquisição mais rápida, permitindo maior sensibilidade a variações instantâneas do sinal. Por outro lado, um tempo de integração maior, como 100 ms, pode promover maior suavização das flutuações, reduzindo ruídos pontuais, mas também podendo atenuar picos mais rápidos de resposta. Dessa maneira, a comparação entre as duas tabelas permite verificar qual configuração apresentou melhor desempenho na estimativa da carga do veículo, considerando os valores obtidos pela lei de formação e os respectivos erros associados.

A Tabela 21, correspondente ao *Volkswagen Worker 8.120*, evidencia comportamento ainda mais uniforme. Os valores de soma dos lados mantiveram pequena variação entre os testes, e os erros percentuais individuais permaneceram baixos. A média final resultou em uma estimativa de 3648,598822 kg, com erro de 0,31%, demonstrando que essa abordagem foi bastante eficiente para esse veículo. Tal resultado sugere que a distribuição de carga e a resposta estrutural do veículo durante os ensaios foram mais homogêneas, favorecendo a estabilidade das medições.

Tabela 21 – Análise da soma dos lados do veículo *Volkswagen Worker 8.120*.

Testes	Pico Eixo 1	Pico Eixo 2	Soma pico 1 e 2	Soma		Lei de formação (kg)	Erro (%)
	( $\mu\epsilon$ )	( $\mu\epsilon$ )	( $\mu\epsilon$ )	Esquerda	Direita		
1° Teste (E) 100 ms	644,27	954,56	1598,83	3295,25		3678,1237	0,50
1° Teste (D) 100 ms	786,80	909,62	1696,42				
2° Teste (E) 100 ms	760,00	917,90	1677,90	3158,18		3619,073944	1,12
2° Teste (D) 100 ms	751,30	728,98	1480,28				
<b>Média</b>			<b>1613,3575</b>	<b>3226,715</b>		<b>3648,598822</b>	<b>0,31</b>

Fonte: Autor (2026).

Já a Tabela 22, referente ao *Volkswagen Worker 6.160*, apresenta resultados intermediários. Embora alguns testes tenham exibido erros percentuais mais elevados que os observados no *Volkswagen Worker 8.120*, a análise pela soma dos lados ainda proporcionou uma aproximação satisfatória da massa real do veículo. A média final obtida foi de 3914,899996 kg, com erro de 4,28%, indicando que, apesar de haver maior dispersão entre os ensaios, a metodologia continuou capaz de representar adequadamente a tendência geral da relação entre deformação e peso.

Tabela 22 – Análise da soma dos lados do veículo *Volkswagen Worker 6.160*.

Testes	Pico Eixo 1	Pico Eixo 2	Soma pico 1 e 2	Soma		Lei de formação (kg)	Erro (%)
	( $\mu\epsilon$ )	( $\mu\epsilon$ )	( $\mu\epsilon$ )	Esquerda	Direita		
1° Teste (E) 100 ms	994,80	1166,57	2161,37	4071,49		4012,527892	1,89
1° Teste (D) 100 ms	976,50	933,62	1910,12				
2° Teste (E) 100 ms	907,11	994,92	1902,03	3769,02		3882,223816	5,08
2° Teste (D) 100 ms	890,25	976,74	1866,99				
3° Teste (E) 100 ms	700,95	944,48	1645,43	3586,20		3803,46496	7,01
3° Teste (D) 100 ms	943,18	997,59	1940,77				
4° Teste (E) 100 ms	875,30	907,06	1782,36	3597,07		3808,147756	6,89
4° Teste (D) 100 ms	985,97	828,74	1814,71				
5° Teste (E) 100 ms	983,89	1293,03	2276,92	4200,57		4068,135556	0,53
5° Teste (D) 100 ms	1022,91	900,74	1923,65				
<b>Média</b>			<b>1922,435</b>	<b>3844,87</b>		<b>3914,899996</b>	<b>4,28</b>

Fonte: Autor (2026).

De forma geral, as Tabelas Tabelas 19, 20, 21 e 22 mostram que a análise baseada na soma da deformação dos lados do veículo foi importante para reduzir a influência de assimetrias observadas entre medições individuais. Ao integrar as respostas obtidas nos lados esquerdo e direito, essa abordagem passou a representar de forma mais fiel o efeito global da carga aplicada pelo veículo sobre o sistema sensor. Como consequência, os valores médios finais apresentaram erros relativamente baixos, especialmente para o Iveco *Daily* com baú e para o *Volkswagen Worker* 8.120, evidenciando que essa estratégia de tratamento dos dados é mais robusta do que a análise baseada apenas em picos isolados.

Além disso, essa terceira análise se mostra particularmente relevante porque considera de maneira mais completa a distribuição de carga no veículo. Enquanto a avaliação individual dos picos pode ser fortemente influenciada por fatores locais, como alinhamento do pneu, pequenas diferenças de trajetória e irregularidades pontuais no contato com a região sensora, a soma dos lados reduz o impacto dessas variações e fornece uma medida mais representativa do carregamento total. Assim, essa abordagem contribui para aumentar a confiabilidade da calibração e reforça o potencial do sistema para aplicações de estimativa de peso veicular.

Na quarta etapa da análise, foi considerada a média da soma da deformação dos lados do caminhão para cada veículo avaliado, com o objetivo de obter uma representação mais consolidada e estável da resposta do sistema sensor. Nessa abordagem, partiram-se dos resultados obtidos na análise anterior, em que as deformações dos lados esquerdo e direito haviam sido somadas em cada teste, e então foi calculada uma média representativa para cada caminhão. A partir desses valores médios, tornou-se possível comparar diretamente a resposta global dos veículos com os respectivos pesos medidos em balança, reduzindo a influência de variações

pontuais observadas nos ensaios individuais.

A Tabela 23 apresenta os valores médios da soma dos lados para os três veículos analisados, bem como os pesos medidos na CEASA-CE (Centrais de Abastecimento do Ceará), os valores estimados pela aplicação da lei de formação, o erro absoluto e o erro percentual absoluto correspondente. Observa-se que o *Iveco Daily com baú* apresentou média da soma dos lados igual a 6101,660411  $\mu\epsilon$ , resultando em peso estimado de 4887,125305 kg, com erro percentual absoluto de apenas 0,06%. O *Volkswagen Worker 8.120* apresentou média de 3226,715  $\mu\epsilon$  e peso estimado de 3648,598822 kg, com erro percentual absoluto de 0,31%. Já o *Volkswagen Worker 6.160* apresentou média de 3844,87  $\mu\epsilon$ , com massa estimada de 3914,899996 kg, correspondendo a um erro percentual absoluto de 4,28%.

Tabela 23 – Análise da média da soma dos lados do veículo para os três veículos avaliados.

Veículo	Média da soma dos lados do veículo ( $\mu\epsilon$ )	Peso medido CEASA (kg)	Lei de formação (kg)	Erro absoluto	Erro percentual absoluto (%)
Volkswagen Worker 6.160	3844,87	4090	3914,899996	175,100004	4,28
Volkswagen Worker 8.120	3226,715	3660	3648,598822	11,401178	0,31
Iveco Daily com baú	6101,660411	4890	4887,125305	2,874694893	0,06

Fonte: Autor (2026).

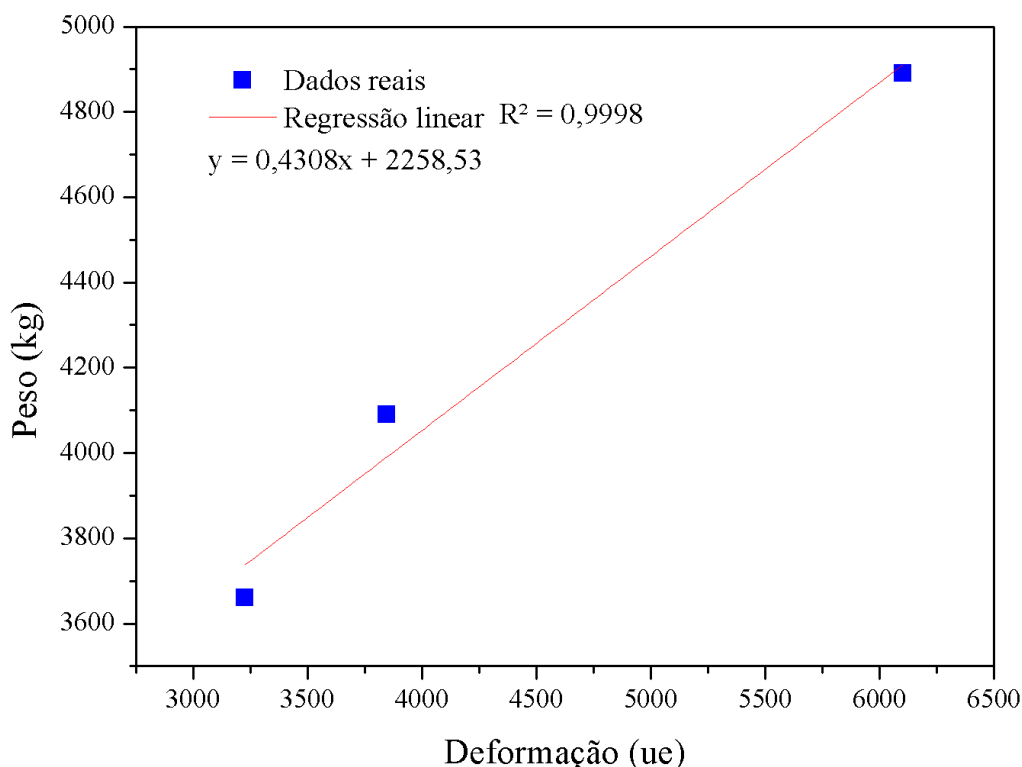
Esses resultados mostram que a utilização da média da soma das deformações laterais proporcionou estimativas bastante próximas dos valores reais, sobretudo para o *Iveco Daily com baú* e para o *Volkswagen Worker 8.120*. Mesmo no caso do *Volkswagen Worker 6.160*, que apresentou erro mais elevado em comparação aos demais, a aproximação ainda se manteve satisfatória, indicando que a metodologia foi capaz de representar adequadamente a tendência global entre deformação e peso.

A Figura 39 apresenta o gráfico de regressão linear obtido a partir desses valores médios, relacionando a deformação média da soma dos lados com o peso correspondente dos veículos. Observa-se que os pontos experimentais apresentaram excelente aderência ao modelo linear ajustado, resultando na equação:

$$y = 0,4308x + 2258,53.$$

Em que  $y$  representa o peso estimado do veículo, em quilogramas, e  $x$  corresponde à média da soma da deformação dos lados, em microdeformação. O coeficiente de determinação obtido foi  $R^2 = 0,9998$ , indicando um ajuste linear extremamente elevado entre as variáveis analisadas.

Figura 39 – Relação entre a deformação média por caminhão e o peso de referência dos veículos, com ajuste linear dos dados experimentais.



Fonte: Autor (2026).

Esse resultado reforça que a média da soma dos lados constitui a abordagem mais robusta entre as estratégias avaliadas no relatório, pois combina duas vantagens importantes: a integração das respostas dos lados esquerdo e direito do veículo e a suavização das variações experimentais por meio do cálculo da média. Dessa forma, reduz-se a influência de assimetrias locais, pequenas diferenças de posicionamento e oscilações individuais dos ensaios, obtendo-se uma variável mais representativa do carregamento total aplicado sobre a região sensora.

De forma geral, a Tabela 23 e a Figura 39 mostram que a análise baseada na média da soma da deformação dos lados do caminhão foi a que apresentou o melhor desempenho global, tanto em termos de erro quanto de correlação linear. Isso indica que essa abordagem é a mais adequada para descrever a relação entre a resposta do sensor e o peso dos veículos avaliados, constituindo, portanto, a forma mais confiável de calibração entre as analisadas neste estudo.

## 5.2.4 Testes dinâmicos de fluxo livre

### 5.2.4.1 Análise dos resultados dos testes dinâmicos em campo em fluxo livre

A análise dos resultados obtidos nos testes dinâmicos em campo em fluxo livre foi conduzida com o objetivo de avaliar a capacidade do sistema baseado em sensores FBG em estimar a carga dos veículos sob condições reais de tráfego. Para isso, a investigação foi estruturada em duas etapas principais: na primeira, buscou-se verificar a possibilidade de transferir para o campo o modelo previamente calibrado em laboratório; na segunda, foram desenvolvidos e avaliados modelos treinados diretamente com os dados adquiridos em campo. Essa estratégia permitiu não apenas comparar o comportamento do sistema em ambientes distintos, mas também identificar os fatores que limitaram seu desempenho em condições operacionais reais.

Inicialmente, foi realizada uma comparação entre as condições experimentais do laboratório e do campo, evidenciando diferenças importantes quanto ao tipo de carregamento, duração da medição, número de sensores disponíveis, faixa de temperatura e grau de controle experimental. Conforme apresentado na Tabela 24, os ensaios laboratoriais foram realizados em condições estáticas e controladas, enquanto os ensaios de campo ocorreram em fluxo livre, sob condições dinâmicas e com diversas variáveis não controladas.

Tabela 24 – Comparação entre as condições experimentais de laboratório e de campo.

<b>Aspecto</b>	<b>Laboratório</b>	<b>Campo</b>
Tipo de carga	Estática (pesos aplicados)	Dinâmica (veículo em movimento)
Duração da medição	Contínua (~ 100 leituras estáveis)	Transiente (~ 0,5 a 1,5 s)
Repetições	3 por carga	1 por veículo
Sensores	9 FBGs (FBG_0 a FBG_8)	4 FBGs (FBG_0 a FBG_3)
Temperatura	25 a 36 °C	48 a 54 °C
Variáveis controladas	Carga, posição e temperatura	Nenhuma

Fonte: Autor (2026).

Na primeira etapa da análise, partiu-se da hipótese de que o modelo ajustado com dados laboratoriais poderia ser aplicado ao contexto de fluxo livre. Entretanto, essa abordagem mostrou-se inicialmente inviável, uma vez que o modelo original havia sido treinado com sensores que não estavam disponíveis durante os ensaios de campo. Por essa razão, foi necessário retreinar

o modelo utilizando apenas os quatro sensores comuns entre os dois cenários experimentais. Embora o modelo retreinado ainda apresentasse desempenho satisfatório no laboratório, sua aplicação direta aos dados absolutos de campo resultou em erros extremamente elevados, com previsões incompatíveis com os pesos reais dos veículos analisados. A Tabela 25 mostra que, mesmo com o uso de um subconjunto de sensores, o desempenho em laboratório permaneceu bom, o que indica que a principal limitação não estava na redução do número de sensores, mas sim na mudança do ambiente experimental. É válido salientar que o comprimento de onda de cada uma dessas grades foi devidamente apresentado em seções anteriores.

Tabela 25 – Desempenho do modelo original e do modelo retreinado com sensores comuns ao laboratório e ao campo.

<b>Modelo</b>	<b>MAE</b>	<b>Erro médio</b>	<b>Erro máximo</b>
Original (FBG_0, FBG_3, FBG_6, FBG_8)	19,4 kgf	2,25%	4,58%
Retreinado (FBG_0, FBG_1, FBG_2, FBG_3)	26,8 kgf	2,88%	5,71%

Fonte: Autor (2026).

Esse comportamento foi atribuído à presença de um deslocamento de *baseline* significativo entre os dois ambientes, associado principalmente à diferença de temperatura, às condições de montagem e ao nível de referência dos sinais. A Tabela 26 apresenta um exemplo desse deslocamento para o sensor FBG\_3, evidenciando que os níveis medidos em campo se afastaram substancialmente daqueles observados em laboratório. Esse deslocamento fez com que o modelo polinomial operasse fora da faixa em que havia sido treinado, gerando extrapolações catastróficas.

Tabela 26 – Exemplo de deslocamento de *baseline* entre os sinais de laboratório e de campo.

<b>Sensor</b>	<b>Laboratório (referência ~ 500 kgf)</b>	<b>Campo (mediana)</b>
FBG_3	~ 500 $\mu\epsilon$	-139 a +134 $\mu\epsilon$

Fonte: Autor (2026).

Diante desse problema, adotou-se em seguida uma abordagem baseada na variação relativa do sinal, utilizando o parâmetro *delta*, definido como a diferença entre o sinal medido e uma linha de base calculada a partir do início e do fim de cada registro. O objetivo dessa etapa foi reduzir o efeito do *offset* térmico e extrair apenas a contribuição associada à passagem do veículo sobre a região instrumentada. Para isso, diferentes estratégias de extração foram testadas, incluindo a mediana do sinal, o valor de pico em torno do máximo da resposta e os valores

extremos por sensor. Apesar dessa tentativa de normalização, os resultados mostraram que as correlações entre os deltas e o peso dos veículos em campo permaneceram fracas e, em alguns casos, até inverteram o comportamento observado em laboratório. A Tabela 27 mostra essa mudança de comportamento, destacando, por exemplo, a inversão observada no FBG\_3, que passou de forte correlação positiva em laboratório para correlação fraca e negativa em campo.

Tabela 27 – Correlação entre os deltas dos sensores e o peso nos cenários de laboratório e de campo.

<b>Sensor</b>	<b><i>r</i> (lab)</b>	<b><i>r</i> (campo, delta pico)</b>
FBG_0	-0,64	-0,23
FBG_1	+0,17	+0,34
FBG_2	+0,15	-0,27
FBG_3	+0,91	-0,29

Fonte: Autor (2026).

Esses resultados evidenciaram que o padrão de resposta do sistema em fluxo livre não reproduzia a relação observada em condições estáticas controladas. A partir dessa constatação, a segunda etapa da análise concentrou-se na construção de modelos treinados exclusivamente com dados de campo. Para garantir uma avaliação mais rigorosa da capacidade de generalização, foi adotada validação do tipo *Leave-One-Out* por veículo, em que, a cada iteração, um veículo era retirado do conjunto de treinamento e utilizado como amostra de teste. O primeiro modelo avaliado nessa etapa foi um *Ridge Poly2* baseado nos deltas de pico dos quatro sensores. Os resultados obtidos mostraram desempenho insatisfatório, com erro absoluto médio de 224 kg, erro percentual médio de 18,3% e coeficiente de determinação negativo, conforme sintetizado na Tabela 31.

Na sequência, foram realizadas tentativas de melhoria a partir da filtragem de eventos com melhor relação sinal-ruído. A hipótese considerada foi a de que passagens mais bem definidas, com maior qualidade de sinal, poderiam representar situações em que a influência de variáveis externas fosse menor. De fato, em um subconjunto reduzido de amostras com SNR mais elevada, houve melhora aparente dos indicadores estatísticos. A Tabela 28 mostra que as correlações se tornaram mais intensas após a filtragem, enquanto a Tabela 31 indica que um modelo *Ridge* atingiu  $R^2 \approx 0,46$  nesse subconjunto. No entanto, esse ganho ocorreu em um conjunto muito pequeno de veículos, o que restringe fortemente sua validade e impossibilita generalizações seguras.

Assim, embora a filtragem por qualidade de sinal tenha mostrado algum potencial,

Tabela 28 – Comparação das correlações antes e após a filtragem por qualidade de sinal (SNR).

<b>Feature</b>	<b><math>r</math> (19 veículos)</b>	<b><math>r</math> (9 filtrados)</b>
Delta FBG_3 pico	-0,32	-0,72
Delta FBG_0 pico	-0,34	-0,64
Delta FBG_2 pico	+0,19	+0,56
Delta FBG_1 média	+0,26	+0,55

Fonte: Autor (2026).

ela não foi suficiente para comprovar a viabilidade do método nas condições de fluxo livre analisadas.

Buscando ampliar o conteúdo informacional extraído dos registros, a análise também incluiu uma etapa de engenharia de atributos. Nessa fase, foram calculadas dezenas de características derivadas dos sinais temporais, abrangendo estatísticas descritivas, energia, métricas espectrais, parâmetros associados à forma do pulso, relações entre sensores e descritores globais do evento. A Tabela 29 apresenta algumas das melhores correlações obtidas entre atributos extraídos e o peso dos veículos, mostrando que, embora certas *features* tenham alcançado correlações moderadas, nenhuma delas foi suficiente para assegurar desempenho robusto em validação.

Tabela 29 – Melhores correlações entre atributos extraídos dos sinais e o peso dos veículos em campo.

<b>Feature</b>	<b><math>r</math></b>
Energia FFT FBG_1	+0,61
Energia total (4 sensores)	+0,58
FFT peak FBG_0	+0,56
Energia FBG_1	+0,56
Taxa de cruzamento por zero FBG_0	-0,52
Mínimo FBG_0	-0,51

Fonte: Autor (2026).

Paralelamente, aplicou-se uma estratégia de *data augmentation*, com geração de amostras sintéticas a partir de perturbações controladas, como cortes temporais e adição de ruído gaussiano. Também foram testadas abordagens baseadas em amostras temporais individuais e em janelas deslizantes, visando aumentar o número efetivo de exemplos disponíveis para treinamento. Apesar dessas tentativas, os resultados permaneceram limitados. A Tabela 30 resume os resultados associados às abordagens baseadas em amostras temporais e janelas deslizantes, evidenciando baixos valores de  $R^2$  e erros médios ainda elevados.

Ressalta-se que a técnica de *augmentation* utilizada não adiciona informação física

Tabela 30 – Resultados obtidos com modelos baseados em amostras temporais e janelas deslizantes.

<b>Método</b>	<b>Amostras</b>	<b>MAE</b>	<b>Erro (%)</b>	<b><math>R^2</math></b>
Amostra temporal + Ridge	1296	217 kg	17,8%	-0,13
Amostra temporal + Poly2	1296	214 kg	17,5%	-0,11
Janelas deslizantes (77 ms)	613	213 kg	17,3%	-0,08
Janelas deslizantes (169 ms)	230	221 kg	18,2%	-0,13

Fonte: Autor (2026).

nova ao problema, apenas variantes de um mesmo sinal original. De modo geral, o panorama da Fase 2 é apresentado na Tabela 31, que sintetiza as principais abordagens testadas, o número de amostras consideradas, os modelos aplicados e os respectivos indicadores de desempenho.

Tabela 31 – Resumo das abordagens testadas na Fase 2 com modelos treinados diretamente com dados de campo.

<b>#</b>	<b>Abordagem</b>	<b>Amostras</b>	<b>Modelo</b>	<b>MAE</b>	<b>Err%</b>	<b><math>R^2</math> LOO</b>
4	Delta pico (4 sensores)	19	Ridge Poly2	224 kg	18,3%	-0,18
5	Filtragem SNR > 3,5	9	Ridge	182 kg	14,6%	0,46
6	81 features + augmentation	300	Ridge	193 kg	16,0%	0,26
7	Janelas deslizantes	613	Ridge	213 kg	17,3%	-0,08
8	Amostras temporais + Poly2	1296	Ridge Poly2	214 kg	17,5%	-0,11
9	21 tipos de modelo × 5 conjuntos de atributos	19	AdaBoost (melhor)	188 kg	14,9%	0,14
10	21 tipos de modelo × 5 conjuntos de atributos	19	RF 100 (melhor $R^2$ )	191 kg	15,4%	0,22

Fonte: Autor (2026).

Adicionalmente, foi realizada uma comparação abrangente entre diferentes algoritmos de regressão, incluindo modelos lineares regularizados, métodos baseados em vizinhança, máquinas de vetor de suporte, árvores de decisão, comitês de árvores e redes neurais. No total, foram avaliadas 105 combinações entre modelos e conjuntos de atributos. Os resultados mostraram que nenhum algoritmo foi capaz de produzir estimativas com precisão considerada útil para aplicação prática. A Tabela 32 apresenta os dez melhores resultados obtidos nessa comparação, permitindo observar que, mesmo nas melhores configurações, os indicadores permaneceram modestos.

Esse comportamento reforça a interpretação de que a limitação principal não estava associada à escolha do algoritmo, mas sim à baixa capacidade dos sinais medidos em fluxo livre de representar, de forma isolada, o peso total dos veículos.

Outro aspecto importante da análise foi a identificação de *overfitting*. Quando avaliados sobre os próprios dados de treinamento, alguns modelos apresentaram métricas aparentemente muito boas. Contudo, ao serem submetidos à validação Leave-One-Out, o desempenho

Tabela 32 – Top 10 resultados obtidos na comparação entre diferentes tipos de modelos e conjuntos de atributos.

#	Modelo	Features	MAE	Err%	Max%	$R^2$
1	AdaBoost	Top 20	188 kg	14,9%	37,3%	0,139
2	SVR poly	Top 10	190 kg	15,6%	37,2%	0,191
3	Random Forest 100	Top 20	191 kg	15,4%	29,5%	0,215
4	KNN-5	Top 5	191 kg	14,6%	38,5%	0,052
5	SVR poly	Top 20	192 kg	15,3%	38,8%	0,158
6	SVR linear	Peaks 4	194 kg	15,0%	41,6%	-0,040
7	Decision Tree	Top 20	195 kg	16,1%	40,4%	0,128
8	RF 50	Top 10	196 kg	15,9%	27,4%	0,246
9	Extra Trees	Top 20	196 kg	15,9%	32,8%	0,140
10	Decision Tree	Top 10	196 kg	15,9%	36,5%	0,207

Fonte: Autor (2026)

caía drasticamente, evidenciando que o aprendizado obtido não se generalizava para novos veículos. Esse comportamento é ilustrado na Tabela 33, que compara os resultados obtidos em treinamento e validação para o modelo Random Forest. Nota-se que, embora o desempenho *in-sample* tenha sido elevado, a qualidade das previsões caiu substancialmente quando o modelo foi aplicado a veículos não vistos.

Tabela 33 – Comparação entre desempenho em treinamento e validação Leave-One-Out para análise de overfitting.

Métrica	In-Sample	LOO
MAE	68 kg (5,5%)	191 kg (15,4%)
$R^2$	0,901	0,215
Spearman rho	0,972	0,283
Acerto de faixa (leve/médio/pesado)	79%	26%
Ranking pairwise (quem é mais pesado)	98%	59%

Fonte: Autor (2026)

Assim, concluiu-se que parte dos resultados promissores observados inicialmente refletia apenas memorização do conjunto de dados, e não a aprendizagem de uma relação física consistente entre os sinais dos sensores e a carga veicular.

Com base no conjunto dos resultados, conclui-se que a dificuldade de estimar o peso dos veículos em fluxo livre decorre predominantemente de fatores físicos e experimentais, e não apenas de limitações computacionais. Entre os principais fatores de confusão identificados estão a velocidade do veículo, a posição lateral de passagem sobre a via instrumentada, o número e o espaçamento entre eixos, as características dos pneus e a temperatura de operação. Além disso, o sistema parece responder mais diretamente à carga por eixo do que ao peso total do veículo, o que reduz ainda mais a possibilidade de inferência direta da massa global a partir de uma única passagem não controlada. Como evidência conclusiva, observou-se que dois

veículos idênticos, com mesma massa nominal, produziram respostas completamente distintas em passagens diferentes, inclusive com mudança de sinal. Esse resultado demonstra que, nas condições experimentais adotadas, as variáveis não controladas dominaram a resposta dos sensores e mascararam a informação associada ao peso.

Portanto, a análise dos testes dinâmicos em campo em fluxo livre mostrou que, embora o sistema apresente sensibilidade à passagem dos veículos, os dados obtidos não contêm informação suficientemente discriminante para permitir a estimativa confiável do peso nas condições avaliadas. Os resultados indicam que a viabilidade dessa aplicação depende da reformulação do protocolo experimental, com maior controle sobre velocidade, trajetória, repetibilidade das passagens e instrumentação auxiliar, de modo a reduzir a influência das variáveis confundidoras e aumentar a qualidade física da informação fornecida aos modelos matemáticos.

#### *5.2.4.2 Análise complementar dos registros dinâmicos em fluxo livre*

Embora os resultados obtidos nos testes dinâmicos em fluxo livre não tenham sido satisfatórios para a medição precisa e confiável do peso em movimento, os ensaios realizados permitiram observar aspectos relevantes do comportamento do sistema sensorial em condições reais de tráfego. Em particular, verificou-se que, mesmo diante da elevada variabilidade imposta pelas condições de campo, os sensores apresentaram sensibilidade suficiente para detectar a passagem dos eixos dos veículos, produzindo picos de deformação identificáveis nos registros temporais. Esse resultado é importante, pois indica que, mesmo quando a estimativa direta de peso total não se mostra robusta, ainda é possível explorar outras grandezas cinemáticas e estruturais do veículo a partir da resposta medida.

Nesse contexto, os resultados sugerem que a principal limitação do sistema, na configuração atualmente utilizada, não está na ausência de resposta sensorial, mas na complexidade do problema de inferência de peso em fluxo livre. Para alcançar uma modelagem mais confiável, torna-se necessário ampliar o banco de dados experimental, incorporando maior número de veículos, mais repetições por classe veicular e maior diversidade de condições operacionais, de forma a fornecer ao modelo de aprendizado de máquina um conjunto mais representativo para treinamento, validação e seleção da arquitetura mais adequada. Além disso, torna-se igualmente necessária uma compensação mais refinada das variáveis de campo não controladas, tais como temperatura, velocidade, trajetória lateral do veículo, distribuição de carga por eixo, características dos pneus e irregularidades do pavimento.

Apesar dessas limitações, os registros obtidos evidenciam claramente a sensibilidade do sensor à detecção dos eixos dos veículos. A presença de dois picos principais em diversos sinais medidos pelo sistema *BraggSens* está associada, de forma coerente, à passagem dos dois eixos dos automóveis analisados. A partir dessa informação, conhecendo-se previamente a distância entre eixos do veículo e medindo-se o intervalo de tempo entre os picos de detecção, foi possível estimar a velocidade de deslocamento durante a passagem sobre a região instrumentada.

A Figura 40 apresenta o registro dinâmico correspondente ao veículo *Ford Ecosport FSL 1.6*, enquanto a Tabela 34 resume seus principais parâmetros. Observa-se, na Figura 40(b), a ocorrência de dois picos principais associados à passagem dos dois eixos do veículo sobre a região sensorial. A partir da distância entre eixos de 2,521 m e do intervalo de tempo de 0,487 s entre as detecções, estimou-se uma velocidade de 5,17 m/s, equivalente a 18,63 km/h, conforme indicado na Tabela 34.

Figura 40 – Registro dinâmico da passagem do veículo Ford Ecosport FSL 1.6 em teste de campo em fluxo livre: (a) imagem do veículo durante a travessia sobre a região instrumentada; (b) resposta temporal de deformação (*strain*) medida pelo sistema *BraggSens*, evidenciando os picos associados à passagem dos eixos.



Fonte: Autor (2026).

Os valores de *strain* registrados para os dois eixos também evidenciam a resposta do conjunto de FBGs à excitação mecânica produzida pela passagem do veículo, confirmando a capacidade do sistema em identificar eventos sucessivos de carregamento.

De modo semelhante, a Figura 41 mostra o ensaio realizado com o veículo *Fiat Siena Attract 1.0*, e a Tabela 35 apresenta as informações extraídas desse registro. Na Figura 41(b), também se observam dois eventos principais de resposta, compatíveis com a passagem dos dois eixos do automóvel. Utilizando-se a distância entre eixos de 2,374 m e o tempo de passagem

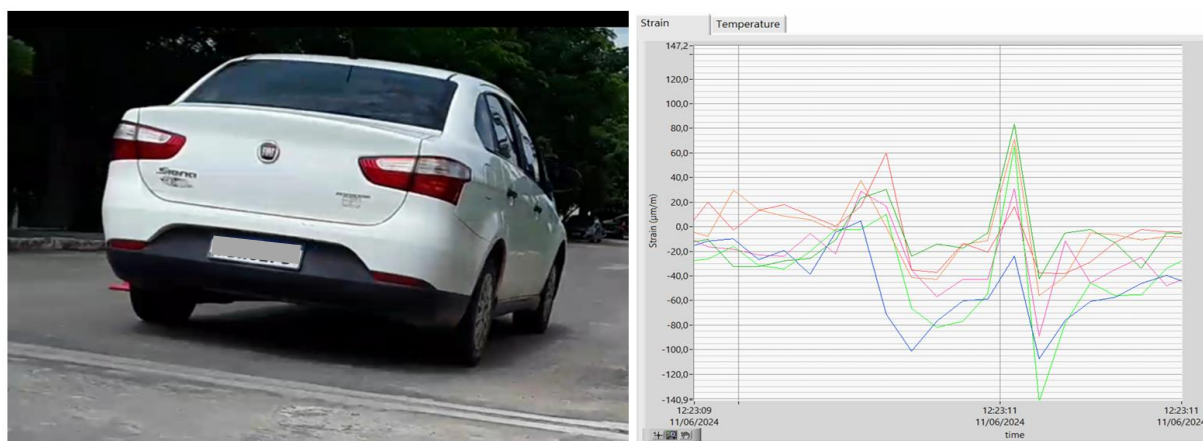
Tabela 34 – Informações do veículo Ford/Ecosport FSL 1.6.

Modelo	FORD/ECOSPORT FSL 1.6
Ano e Quantidade de Eixos	2015, 2 Eixos
Distância entre Eixos e Peso Tabelado	2.521 m, 1243 kg
Tempo de Passagem 2 eixos	0,487 s
Velocidade Estimada	$(2,521/0,487) = (5,17 \text{ m/s}) \mid (18,63 \text{ km/h})$
Valores <i>Strain</i> - Eixo 1 (FBGs 3,5,2,6,1,7,0)	(129.0, -147.5, -7.7, 0.5, 16.8, 108.3, 60.7) uE
Valores <i>Strain</i> - Eixo 2 (FBGs 3,5,2,6,1,7,0)	(42.1, -16.9, 36.8, 79.5, 44.7, 83.4, 103.7) uE

Fonte: Autor (2026)

de 0,488 s, estimou-se uma velocidade de 4,86 m/s, correspondente a 17,5 km/h, conforme apresentado na Tabela 35.

Figura 41 – Registro dinâmico da passagem do veículo Fiat Siena Attract 1.0 em teste de campo em fluxo livre: (a) imagem do veículo durante a travessia sobre a região instrumentada; (b) resposta temporal de deformação (*strain*) medida pelo sistema *BraggSens*, mostrando os picos correspondentes à passagem dos dois eixos.



(a)

(b)

Fonte: Autor (2026).

Ainda que as amplitudes observadas sejam inferiores às registradas para veículos mais pesados, a separação temporal entre os picos permanece suficientemente definida para possibilitar a identificação dos eixos e o cálculo da velocidade.

Já para o *Jeep Compass Longitude D*, mostrado na Figura 42 e descrito na Tabela 36, nota-se novamente a presença de dois picos de resposta bem definidos no sinal medido, evidenciando a passagem sequencial dos dois eixos do veículo. Nesse caso, considerando-se a distância entre eixos de 2,633 m e o intervalo de tempo de 0,681 s, estimou-se uma velocidade

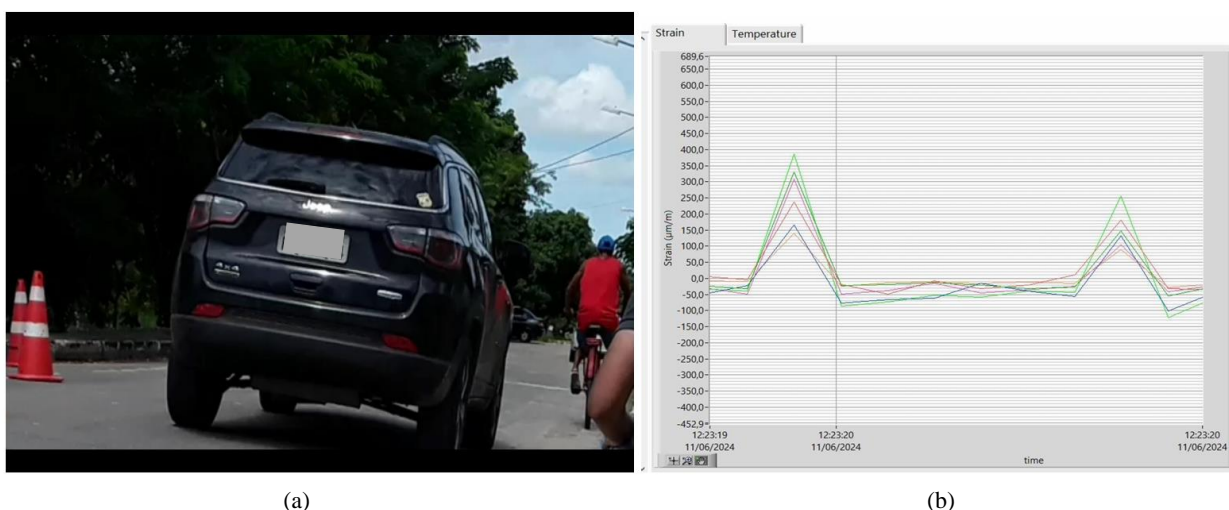
Tabela 35 – Informações do veículo FIAT/SIENA ATTRACT 1.0.

Modelo	FIAT/SIENA ATTRACT 1.0
Ano e Quantidade de Eixos	2019, 2 Eixos
Distância entre Eixos e Peso Tabelaado	2,374 m, 1060 kg
Tempo de Passagem 2 eixos	0,488 s
Velocidade Estimada	$(2,374/0,488 \text{ s}) = (4,86 \text{ m/s}) \mid (17,5 \text{ km/h})$
Valores <i>Strain</i> - Eixo 1 (FBGs 3,5,2,6,1,7,0)	(30.1, -71.2, 23.7, -0.5, 59.9, 9.8, 16.4) uE
Valores <i>Strain</i> - Eixo 2 (FBGs 3,5,2,6,1,7,0)	(83.6, -24.0, 70.8, 71.1, 15.8, 65.5, 30.8) uE

Fonte: Autor (2026)

de 3,86 m/s, equivalente a 13,91 km/h. A Tabela 36 também mostra que esse ensaio foi realizado sob temperatura de 47,6 °C, reforçando a importância de considerar os efeitos térmicos nas medições em campo. Além disso, os valores de deformação registrados para o primeiro e o segundo eixos apresentam magnitudes distintas, indicando que a resposta sensorial também é influenciada pela distribuição de carga entre os eixos e pelas condições instantâneas de contato do veículo com o pavimento.

Figura 42 – Registro dinâmico da passagem do veículo Jeep Compass Longitude D em teste de campo em fluxo livre: (a) imagem do veículo durante a travessia sobre a região instrumentada; (b) resposta temporal de deformação (*strain*) medida pelo sistema *BraggSens*, destacando os eventos associados à passagem sequencial dos eixos do veículo.



Fonte: Autor (2026).

A análise conjunta das Figuras 40, 41 e 42, em associação com as Tabelas 34, 35 e 36, mostra que o sistema foi capaz de registrar, de forma consistente, a assinatura temporal

Tabela 36 – Informações do veículo Jeep Compass Longitude D.

<b>Modelo</b>	<b>JEEP/COMPASS LONGITUDE D</b>
<b>Ano e Quantidade de Eixos</b>	2017, 2 Eixos
<b>Distância entre Eixos e Peso Tabelado</b>	2.633 m, 1720 kg
<b>Tempo de Passagem 2 eixos e Temperatura</b>	0,681 s, 47.6°C
<b>Velocidade Estimada</b>	$(2,633/0,681) = (3,86 \text{ m/s}) \mid (13,91 \text{ km/h})$
<b>Valores <i>Strain</i> - Eixo 1 (FBGs 3,5,2,6,1,7,0)</b>	(330.5, 166.6, 220.5, 139.2, 237.9, 386.5, 60.7) uE
<b>Valores <i>Strain</i> - Eixo 2 (FBGs 3,5,2,6,1,7,0)</b>	(146.5, 132.5, 173.4, 88.5, 181.4, 255.6, 103.7) uE

Fonte: Autor (2026)

da passagem dos eixos veiculares. Esse resultado confirma a viabilidade do uso do sensor para aplicações de detecção de eventos, contagem de eixos e estimativa de velocidade, mesmo que, na forma atual do experimento, a estimativa precisa do peso total em movimento ainda demande aperfeiçoamentos adicionais.

Assim, embora os testes dinâmicos em fluxo livre ainda não tenham produzido um modelo suficientemente robusto para a pesagem em movimento com alta confiabilidade, os resultados obtidos em campo são promissores ao demonstrar que a resposta dos sensores contém informação física útil sobre a passagem dos veículos. Esses achados indicam que futuras melhorias experimentais, associadas à ampliação do banco de dados e ao tratamento mais eficiente das variáveis de campo não controladas, poderão contribuir para o avanço do sistema em direção a aplicações mais completas de monitoramento veicular.

## 6 CONCLUSÕES

Ao longo desta tese, foi demonstrada a viabilidade do uso de sensores ópticos em fibra para o monitoramento de sistemas de transporte em condições reais de operação, abrangendo desde a concepção dos dispositivos até sua integração, instrumentação, aquisição de dados e validação experimental. Em conjunto, os resultados obtidos confirmam que a fibra óptica constitui uma alternativa tecnologicamente promissora para aplicações em monitoramento ferroviário e rodoviário, sobretudo pelas vantagens já amplamente reconhecidas na literatura, como imunidade à interferência eletromagnética, boa sensibilidade, possibilidade de operação em ambientes agressivos e potencial de integração em sistemas inteligentes de monitoramento. Esses atributos vêm sendo apontados como relevantes em revisões de referência sobre monitoramento ferroviário com sensores ópticos, mas esta tese avança ao apresentar duas soluções experimentais completas, testadas em cenários reais e voltadas a problemas concretos de operação e segurança.

No caso do sensor na configuração SMS, os resultados confirmaram que a estrutura proposta é uma alternativa simples, sensível e de baixo custo para a detecção de trens a partir das vibrações induzidas no trilho. Um dos diferenciais centrais deste trabalho está justamente no fato de explorar uma aplicação ferroviária ainda pouco abordada de forma experimental com sensores desse tipo, especialmente com validação em campo e comparação entre diferentes tipos de veículos ferroviários. Enquanto a literatura costuma enfatizar, principalmente, o uso de sensores SMS para monitoramento estrutural, medição de vibração, deformação, vibração acústica ou em aplicações gerais de vibração, como se verifica nos trabalhos discutidos na Seção 2, mais especificamente nos trabalhos apresentados por Gao *et al.* (2018) e Sun *et al.* (2017), esta tese mostrou que uma configuração interferométrica compacta e de implementação simples como o sensor SMS também é adequada pra aplicações ferroviárias, sendo capazes de detectar a presença de veículos ferroviários com precisão e robustez em ambiente real de operação. Além disso, ao comparar veículos como VLT, trem de carga e trem de manutenção, o trabalho acrescenta uma dimensão prática importante, pois não se limita à simples detecção de passagem, mas evidencia diferenças coerentes entre assinaturas vibratórias associadas a distintas condições operacionais.

Outro aspecto que fortalece a contribuição do sensor SMS é a estratégia de processamento adotada. Os resultados mostraram que abordagens baseadas na variabilidade do sinal, como derivada temporal e variância, são mais robustas em campo do que métodos baseados em limiares absolutos, sobretudo diante de deriva de *baseline* e da natureza não estacionária dos

sinais reais. Esse ponto representa um avanço metodológico relevante, porque desloca o foco da mera observação da amplitude para uma análise mais aderente às condições efetivas de operação. A investigação no domínio da frequência reforçou essa interpretação ao mostrar concentração de energia em baixas frequências e diferenças espectrais entre os tipos de composição avaliados. Em especial, a relação aproximadamente linear entre a energia espectral na faixa de 0 a 12 Hz e o peso dos veículos sugere que o sistema pode evoluir de uma solução de detecção para uma ferramenta de caracterização e classificação ferroviária, ampliando seu alcance aplicado.

Em relação ao sistema WIM com FBG, os resultados obtidos também evidenciaram uma contribuição consistente para o avanço do monitoramento veicular por fibra óptica. Trabalhos anteriores com FBG já demonstraram o potencial desses sensores para contagem de eixos, classificação de veículos e estimativa de cargas, inclusive com sensores embutidos em pavimentos e testes de campo, como nos estudos de Dubovan *et al.* (2018) e Al-Tarawneh *et al.* (2020). No entanto, boa parte dessa literatura concentra-se na demonstração de sensibilidade do sensor, na resposta à passagem dos eixos ou em estruturas de medição específicas, além de controlar mimimamente variáveis de interferência durante testes de campo. O diferencial desta tese está em combinar o desenvolvimento do sistema óptico-mecânico com uma análise mais refinada dos dados, incluindo calibração experimental, avaliação em laboratório, ensaios estáticos supervisionados em campo, teste de fluxo livre não controlados e exploração de técnicas de aprendizado de máquina para interpretação dos sinais. Assim, o trabalho não apenas comprova que o sensor responde ao carregamento, mas também busca extrair informação mais robusta e útil para futuras rotinas de predição em cenários reais.

Os ensaios do sistema WIM mostraram que, em laboratório e nas condições estáticas supervisionadas, o protótipo apresentou comportamento coerente e resultados consistentes, confirmando a adequação da estrutura instrumentada e do princípio de medição adotado. Já os testes dinâmicos em fluxo livre evidenciaram, de forma realista, as dificuldades inerentes à pesagem em movimento em ambiente aberto, como influência da velocidade, do posicionamento do veículo, das oscilações mecânicas, do ruído, da temperatura e de outras variáveis não controladas inerentes ao ambiente real. Longe de enfraquecer a tese, esse resultado reforça seu caráter aplicado, porque mostra que o estudo não se limitou a condições ideais de laboratório, mas enfrentou as limitações reais de operação, que muitas vezes aparecem de forma apenas parcial na literatura. Ainda assim, os sinais medidos mostraram capacidade de detectar eixos e de preservar informações relevantes sobre a travessia, indicando que o sistema possui base física

e experimental suficiente para evoluir rumo a modelos mais robustos de estimativa dinâmica de peso.

Dessa forma, a principal contribuição desta tese para a literatura está em ampliar o estado da arte não apenas pela proposição de dois sensores ópticos aplicados ao transporte, mas pela validação experimental de ambas as soluções em contextos reais e pela demonstração de que simplicidade construtiva, baixo custo relativo e processamento de sinais orientado ao comportamento físico podem resultar em sistemas promissores para monitoramento inteligente. No sensor SMS, o destaque está na aplicação ferroviária pouco explorada, na robustez da detecção baseada em variabilidade e na comparação entre diferentes veículos em campo. No sistema WIM com FBG, o diferencial está na articulação entre projeto mecânico, validação experimental e análise de dados com suporte de técnicas computacionais, em uma abordagem mais abrangente do que a simples demonstração da resposta do sensor. Em síntese, a tese consolida duas soluções experimentais funcionalmente relevantes e com claro potencial de evolução, contribuindo para a segurança operacional, a detecção ferroviária, a caracterização de tráfego e o monitoramento inteligente de cargas em sistemas de transporte.

## 7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como perspectivas para a continuidade desta pesquisa, destacam-se os seguintes trabalhos futuros:

- Aprimorar o encapsulamento e a fixação mecânica do sensor SMS, com o objetivo de reduzir efeitos de deriva, instabilidades térmicas e variações de acoplamento em condições reais de operação.
- Investigar o uso combinado de atributos temporais, espectrais e energéticos, associados a técnicas de aprendizado de máquina, para identificação e classificação de veículos ferroviários.
- Avaliar a possibilidade de estimar velocidade e outros parâmetros dinâmicos dos trens, como a carga ou peso, a partir das assinaturas vibratórias registradas pelo sensor SMS.
- Refinar a mecânica e o método de instalação do sistema WIM no pavimento, com foco em estabilidade mecânica, repetibilidade de montagem e redução da influência de variáveis externas indesejadas.
- Construir um banco de dados mais amplo para os ensaios de pesagem dinâmica em fluxo livre, contemplando diferentes categorias de veículos, velocidades, cargas e condições de passagem.
- Desenvolver modelos de calibração específicos para carga por eixo e carga total, incorporando variáveis ópticas, mecânicas e temporais no processo de estimação.
- Realizar testes de campo com múltiplas velocidades e utilizar os dados de velocidade como atributo de entrada no treinamento do modelo de aprendizado de máquina.
- Investigar estratégias de compensação para variações de *baseline*, ruído e demais variáveis de campo não controladas, de modo a aumentar a confiabilidade da pesagem dinâmica.
- Avaliar o desempenho do sistema em campanhas experimentais de longa duração, considerando aspectos como desgaste mecânico, estabilidade do sinal e robustez operacional.

## REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, G. P. **Fiber-optic communication systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.
- AGRAWAL, G. P. **Fiber-Optic Communication Systems**. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2021.
- AL-TARAWNEH, M.; HUANG, Y. In-pavement fiber bragg grating sensors for high-speed weigh-in-motion measurements. In: SPIE. **Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2017**. [S.l.], 2017. v. 10168, p. 547–555.
- AL-TARAWNEH, M.; HUANG, Y.; LU, P.; BRIDGELALL, R. Weigh-in-motion system in flexible pavements using fiber bragg grating sensors part a: Concept. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 21, n. 12, p. 5136–5147, 2020.
- ALAHY, M. E. E.; SUKKUEA, A.; TINA, F. W.; NAG, A.; KURDTHONGMEE, W.; SUWANNARAT, K.; MUKHOPADHYAY, S. C. Integration of iot-enabled technologies and artificial intelligence (ai) for smart city scenario: Recent advancements and future trends. **Sensors**, v. 23, n. 11, 2023. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/23/11/5206>>.
- ALAMANDALA, S.; PUTHA, K.; PRASAD, R. L. N. S.; KUMAR, P. R. Fbg sensing system to study the bridge weigh-in-motion for measuring the vehicle parameters. In: **2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–2.
- ALAMANDALA, S.; Sai Prasad, R.; PANCHARATHI, R. K.; PAVAN, V.; KISHORE, P. Study on bridge weigh in motion (bwim) system for measuring the vehicle parameters based on strain measurement using fbg sensors. **Optical Fiber Technology**, v. 61, p. 102440, 2021. ISSN 1068-5200. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520020304302>>.
- ALHUSSEIN, A. N.; QAID, M. R.; AGLIULLIN, T.; VALEEV, B.; MOROZOV, O.; SAKHABUTDINOV, A. Fiber bragg grating sensors: design, applications, and comparison with other sensing technologies. **Sensors**, MDPI, v. 25, n. 7, p. 2289, 2025.
- AliExpress. **Acoplador óptico SC/APC simplex para fibra óptica**. 2026. Página comercial de produto. Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/item/1005008790973325.html>>.
- AliExpress. **Adaptador de fibra óptica FC macho para SC fêmea**. 2026. Página comercial de produto. Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/item/1005009389974894.html>>.
- AliExpress. **LSLDL 1550 Laser Diode Module**. 2026. Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/item/32843220110.html>>.
- Arduino. **Arduino Mega 2560 Rev3**. [S.l.], 2024. SKU A000067. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf>>.
- Autodesk. **AutoCAD**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/>>.
- CHAN, Y. W. S.; WANG, H.-P.; XIANG, P. Optical fiber sensors for monitoring railway infrastructures: A review towards smart concept. **Symmetry**, v. 13, n. 12, 2021. ISSN 2073-8994. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-8994/13/12/2251>>.

CHEW, S.; ZULKIFLI, A.; HAMAD, H.; HARUN, S.; LEE, L.; RAZAK, H.; ADIKAN, F. Singlemode-multimode-singlemode fiber structure as compressive strain sensor on a reinforced concrete beam. **Optik**, v. 154, p. 705–710, 2018. ISSN 0030-4026. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402617312378>>.

CHOURASIA, R. K.; KATTI, A. Bragg fibers. Springer.

DAMILOS, S.; SALIAKAS, S.; KARASAVVAS, D.; KOUMOULOS, E. P. An overview of tools and challenges for safety evaluation and exposure assessment in industry 4.0. **Applied Sciences**, v. 14, n. 10, 2024. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/14/10/4207>>.

DIAZ, S.; ARMENDÁRIZ, M. ; MATÍAS, I. R. Single-mode-multimode-single-mode fiber (sms): Exploring environmental sensing capabilities. **IEEE Sensors Letters**, v. 8, n. 9, p. 1–4, 2024.

DU, T. L.; HARTOG, A.; HILTON, G.; DIDELET, R. An analysis of railway activity using distributed optical fiber acoustic sensing. **Sensors**, v. 25, n. 13, 2025. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/25/13/4180>>.

DUBOVAN, J.; LITVIK, J.; MARKOVIC, M.; FRNIAK, M. Utilization of fbg's in experimental weighing in motion systems. In: **2018 ELEKTRO**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–4.

EasyEDA. **EasyEDA**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://easyeda.com/>>.

EMIC Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda. **Manual da Linha DL: Modelo DL 30000**. São José dos Pinhais, PR, 2003. Edição 3, janeiro de 2003.

ESBEEN, B. V.; FINET, C.; VANDEBROUCK, R.; KINET, D.; BOELEN, K.; GUYOT, C.; KOUROUSSIS, G.; CAUCHETEUR, C. Smart railway traffic monitoring using fiber bragg grating strain gauges. **Sensors**, v. 22, n. 9, 2022. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/9/3429>>.

Fibras Net SP. **Fast Conector SC/UPC reutilizável para rede FTTH**. 2026. Página comercial de produto. Disponível em: <<https://www.fibrasnetsp.com/produto/fast-conector-scupc-2-flex-10-un.html>>.

FiSens GmbH. **BraggSens**. [S.l.], 2022. Software utilizado para aquisição e visualização de dados de sensores FBG.

FiSens GmbH. **FiSens – Fiber Bragg Grating sensors and custom solutions**. 2022. Site institucional consultado para informações sobre fornecimento de fibras FBG customizadas. Disponível em: <<http://www.fisens.com>>.

FiSens GmbH. **FiSpec FBG X100**. 2022. Página oficial do produto. Disponível em: <<https://fisens.com/products/fispec-fbg-interrogator-x100>>.

FRIDRICH, M.; FAJKUS, M.; KRIZAN, D.; MIKOLASEK, D.; MOHYLA, M.; KONDE, A.; MEC, P.; NEDOMA, J.; MARQUES, C. Design and verification of a non-intrusive portable fbg sensing belt for vehicle detection and speed measurement on road surfaces. **Measurement**, Elsevier, v. 270, p. 120744, 2026.

GAO, R.; WANG, H.; ZHU, D.; FAN, G.; YAN, H.; WANG, P.; LIU, Y.; WANG, Y.; LIU, W.; SONG, L. zhong; WANG, C.; CHEN, Y. Acoustic frequency vibration sensor based on tapered sms fiber structure. **Sensors and Actuators A-physical**, v. 271, p. 243–250, 2018. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:116047096>>.

GRATTAN, K. T.; SUN, T. Fiber optic sensor technology: an overview. **Sensors and Actuators A: Physical**, Elsevier, v. 82, n. 1-3, p. 40–61, 2000.

HILL, K.; MELTZ, G. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1263–1276, 1997.

HUANG, Y.; PALEK, L.; STROMMEN, R.; WOREL, B.; CHEN, G. Real-time weigh-in-motion measurement using fiber bragg grating sensors. In: SPIE. **Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2014**. [S.l.], 2014. v. 9061, p. 47–55.

Intelbras. **Cabo Óptico Drop Compacto 1 Km: CFOAC-BLI A/B-CM-01-FO-CO-LSZH**. [S.l.], 2023. Disponível em: <[https://backend.intelbras.com/sites/default/files/2023-03/Datasheet%20cabo%20drop%20editavel%20ind%20v2\\_1.pdf](https://backend.intelbras.com/sites/default/files/2023-03/Datasheet%20cabo%20drop%20editavel%20ind%20v2_1.pdf)>.

JACOB, B.; Feypell-de La Beaumelle, V. Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. **IATSS Research**, v. 34, n. 1, p. 9–15, 2010. ISSN 0386-1112. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S038611121000004X>>.

KASHYAP, R. **Fiber bragg gratings**. [S.l.]: Academic press, 2009.

KEPAK, S.; CUBIK, J.; ZAVODNY, P.; SISKÁ, P.; DAVIDSON, A.; GLESK, I.; VASINEK, V. Fibre optic track vibration monitoring system. **Optical and Quantum Electronics**, Springer, v. 48, n. 7, p. 354, 2016.

KOWARIK, S.; HUSSELS, M.-T.; CHRUSCICKI, S.; MÜNZENBERGER, S.; LÄMMERHIRT, A.; POHL, P.; SCHUBERT, M. Fiber optic train monitoring with distributed acoustic sensing: Conventional and neural network data analysis. **Sensors**, v. 20, n. 2, 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/2/450>>.

KROHN, D. A.; MACDOUGALL, T.; MENDEZ, A. **Fiber optic sensors: fundamentals and applications**. [S.l.]: Spie Press Bellingham, WA, 2014. v. 4.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.-A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18–23, 2015. ISSN 2213-8463. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221384631400025X>>.

LIU, Q.; WEI, S.; GU, S.; HAN, J.; MA, C.; LU, P.; LV, J.; CHU, P. K.; LIU, C. High-sensitivity fiber bragg grating pressure sensor with a hinged-lever structure. **IEEE Sensors Journal**, v. 25, n. 15, p. 28314–28322, 2025.

MAIA, L. S. P.; MIRANDA, M. A. R.; SOUZA, I. M. X. de; ASSIS, B. C. P. de; ROCHA, D. S.; SASAKI, J. M.; ALEXANDRIA, A. R. de; GUIMARÃES, G. d. F. Optical current and magnetic field sensor using multimodal interference in fiber optics with carbon steel. **IEEE Sensors Journal**, v. 22, n. 13, p. 12877–12885, 2022.

MathWorks. **MATLAB**. [S.l.], 2024. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>.

MEJIA-ARANDA, A.; BASURTO-PENSADO, M.; ANTUNEZ-CERON, E.; CASTRO-GÓMEZ, L.; URQUIZA-BELTRAN, G.; RODRIGUEZ, J.; GARCÍA, J.; SÁNCHEZ-MONDRAGÓN, J.; RUIZ-PÉREZ, V. Fiber optic pressure sensor of 0–0.36 psi by multimode interference technique. **Journal of Applied Research and Technology**, v. 11, n. 5, p. 695–701, 2013. ISSN 1665-6423. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1665642313715773>>.

MORSHED, A. H.; ATTA, R.; PACKIRISAMY, M. Fluidic flow measurement using single mode–multimode–single mode optical fiber sensor. **IEEE Sensors Journal**, v. 21, n. 12, p. 13316–13326, 2021.

NEDOMA, J.; FAJKUS, M.; KAHANKOVA, R. V.; MARTINEK, R.; DVORSKY, M.; VAŇUŠ, J.; VAŠINEK, V.; CVEJN, D. Fiber-optic interferometric sensor for monitoring automobile and rail traffic. **TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING COMPUTER SCIENCES**, v. 26, p. 2987–2996, 11 2018.

NETO, F. P.; MARQUES, R.; ENERGIA, B.; CURADO, P.; PARADISI, A.; AYRES, J. Desenvolvimento de sensor de alta tensão à fibra óptica. **SIJ**, Disponível em:< <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/citenel2007/pdf/it01.pdf>>. Acesso em, v. 10, 2014.

Orbita Digital. **Adaptador de fibra óptica para cambio de conector FC-SC de 2 latiguillos preconectorizados**. 2026. Página comercial de produto. Disponível em: <<https://www.orbitadigital.com/es/fibra-optica/accesorios/1891-adaptador-de-fibra-optica-para-cambio-de-conector-fc-sc-de-2-latiguillos-preconectorizados-caja-5-unidades.html>>.

PÉREZ-ARMENTA, C.; ORTEGA-MOÑUX, A.; LUQUE-GONZALEZ, J. M.; HALIR, R.; REYES-IGLESIAS, P. J.; SCHMID, J.; CHEBEN, P.; MOLINA-FERNÁNDEZ, Í.; WANGÜEMERT-PÉREZ, J. G. Polarization-independent multimode interference coupler with anisotropy-engineered bricked metamaterial. **Photonics research**, Chinese Laser Press and Optica Publishing Group, v. 10, n. 4, p. A57–A65, 2022.

RAN, Y.; XIA, L.; HAN, Y.; LI, W.; ROHOLLAHNEJAD, J.; WEN, Y.; LIU, D. Vibration fiber sensors based on sm-nc-sm fiber structure. **IEEE Photonics Journal**, v. 7, n. 2, p. 1–7, 2015.

Redelease. **Borracha de Silicone Rosa Média Flexibilidade para Moldes com Catalisador (1,030 kg)**. 2026. Página comercial de produto. Disponível em: <<https://www.redelease.com.br/borracha-de-silicone-rosa-media-flexibilidade-para-moldes-com-catalisador-1-030-kg.html>>.

ROCHETI, E. O.; BACURAU, R. M. Weigh-in-motion systems review: Methods for axle and gross vehicle weight estimation. **IEEE Access**, v. 12, p. 134822–134836, 2024.

SINGH, P.; ELMİ, Z.; Krishna Meriga, V.; PASHA, J.; DULEBENETS, M. A. Internet of things for sustainable railway transportation: Past, present, and future. **Cleaner Logistics and Supply Chain**, v. 4, p. 100065, 2022. ISSN 2772-3909. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772390922000385>>.

SNYDER, A. W.; LOVE, J. D. **Optical Waveguide Theory**. Boston, MA, USA: Springer, 1983.

SOLTANI, A.; MOUSAVI, S. F.; FIROUZEH, Z. H.; NEZHAD, A. Z.; NOUROOZI, R. Investigating orbital angular momentum modes in multimode interference (mmi) waveguides and revealing their mode conversion property. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 14, n. 1, p. 21272, 2024.

- SUN, Y.; LIU, D.; LU, P.; SUN, Q.; YANG, W.; WANG, S.; LIU, L.; NI, W. High sensitivity optical fiber strain sensor using twisted multimode fiber based on sms structure. **Optics Communications**, v. 405, p. 416–420, 2017. ISSN 0030-4018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401817307472>>.
- Texas Instruments. **LM117, LM317-N Wide Temperature Three-Pin Adjustable Regulator**. [S.l.], 2026. Datasheet do componente LM317T, consultado via AllDatasheet. Disponível em: <<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1317422/TI/LM317T.html>>.
- Thorlabs. **FGA01FC: InGaAs High Speed Photodiode with FC/PC Bulkhead**. [S.l.], 2017. 24112-S01, Rev F. Disponível em: <<https://media.thorlabs.com/globalassets/items/f/fg/fga/fga01fc/24112-s01.pdf>>.
- Thorlabs. **FG105LVA: 0.10 NA Double-Clad, Step-Index, High Power Multimode Fiber**. [S.l.], 2024. TTN090569-S01, Rev D. Disponível em: <<https://media.thorlabs.com/globalassets/items/f/fg/fg1/fg105lva/ttn090569-s01.pdf>>.
- Thorlabs. **FT200UMT: 0.39 NA TECS Hard-Clad, High-OH, Step-Index, Multimode Fiber: 200 µm Core**. [S.l.], 2024. TTN004593-S01, Rev. A. Disponível em: <<https://media.thorlabs.com/globalassets/items/f/ft/ft2/ft200umt/ttn004593-s01.pdf>>.
- Thorlabs. **GIF50D: 0.200 NA Graded-Index Multimode Fiber**. [S.l.], 2024. TTN140007-S01, Rev. B. Disponível em: <<https://media.thorlabs.com/globalassets/items/g/gi/gif/gif50d/ttn140007-s01.pdf>>.
- UDD, E.; SPILLMAN, W. B. **Fiber Optic Sensors**. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2011.
- VALENTE, N. F.; BILRO, L.; OLIVEIRA, R. Hydrostatic pressure sensor based on polymer optical fiber multimode interferometer. **IEEE Sensors Journal**, v. 23, n. 12, p. 12876–12880, 2023.
- VIEIRA, J.; MORAIS, O.; VASQUES, C.; OLIVEIRA, R. D. A laboratorial prototype of a weight measuring system using optical fiber bragg grating sensors embedded in silicone rubber. **Measurement**, Elsevier, v. 61, p. 58–66, 2015.
- WANG, K.; DONG, X.; KÖHLER, M. H.; KIENLE, P.; BIAN, Q.; JAKOBI, M.; KOCH, A. W. Advances in optical fiber sensors based on multimode interference (mmi): A review. **IEEE Sensors Journal**, v. 21, n. 1, p. 132–142, 2021.
- WANG, Y. **Multimodal Imaging and Data Retrieval through a Multimode Fibre**. Tese (Doutorado) — Queen Mary University of London, 2024.
- ZHANG, Y.; TIAN, X.; XUE, L.; ZHANG, Q.; YANG, L.; ZHU, B. Super-high sensitivity of fiber temperature sensor based on leaky-mode bent sms structure. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 25, n. 6, p. 560–563, 2013.
- ZHANG, Z.; HUANG, Y.; BRIDGELALL, R.; AL-TARAWNEH, M.; LU, P. Optimal system design for weigh-in-motion measurements using in-pavement strain sensors. **IEEE sensors journal**, IEEE, v. 17, n. 23, p. 7677–7684, 2017.
- ZHAO, Y.; LI, X. gang; MENG, F. chao; ZHAO, Z. A vibration-sensing system based on sms fiber structure. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 214, p. 163–167, 2014. ISSN 0924-4247. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424714002271>>.

ZULKIFLI, A.; MASNAN, S.; AZMI, N.; AKIB, S.; AROF, H.; HARUN, S. A simple load sensor based on a bent single-mode-multimode-single-mode fiber structure. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 242, p. 106–110, 2016. ISSN 0924-4247. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424716300796>>.

## APÊNDICE A – FIGURAS E TABELAS COMPLEMENTARES

### COMPONENTES UTILIZADOS NA EQUAÇÃO PARA CADA PONTO DE CALIBRAÇÃO NO MODELO Multi Poly2+Ridge (4 FBGs).

Figura 43 – Tabela: Contribuição detalhada de cada termo w-z (kgf)

Carga (kgf)	FBG_0 (με)	FBG_6 (με)	FBG_3 (με)	FBG_8 (με)	Interc.	cte (w <sub>1</sub> )	FBG_0 (w <sub>2</sub> )	FBG_6 (w <sub>3</sub> )	FBG_3 (w <sub>4</sub> )	FBG_8 (w <sub>5</sub> )	FBG_0' (w <sub>6</sub> )	FBG_0' ×6 (w <sub>7</sub> )	FBG_0' ×3 (w <sub>8</sub> )	FBG_0' ×8 (w <sub>9</sub> )	FBG_6' (w <sub>10</sub> )	FBG_6' ×3 (w <sub>11</sub> )	FBG_6' ×8 (w <sub>12</sub> )	FBG_3' (w <sub>13</sub> )	FBG_3' ×8 (w <sub>14</sub> )	FBG_8' (w <sub>15</sub> )	Predito (kgf)	Erro (kgf)	Erro (%)
500	-14,97	204,83	427,85	-133,80	1028,4	0,0	196,5	439,3	2734,3	161,8	-2,3	-73,4	-118,8	-65,4	-39,7	-1440,3	98,3	-1371,2	-1031,9	-4,1	511,7	+11,7	+2,33
600	-15,78	214,58	450,56	-128,83	1028,4	0,0	183,8	251,8	1921,7	317,3	-2,2	-66,2	-107,8	-64,4	-23,4	-966,3	92,8	-992,8	-968,3	-7,7	596,8	-3,2	-0,53
700	-20,79	216,52	472,05	-132,60	1028,4	0,0	105,2	214,6	1152,6	199,3	-1,6	-41,1	-66,0	-39,0	-20,1	-676,8	68,4	-616,5	-606,8	-5,0	695,8	-4,2	-0,60
800	-22,68	220,99	493,80	-135,07	1028,4	0,0	75,6	128,6	374,0	121,8	-1,3	-29,6	-44,6	-28,2	-12,4	-314,1	42,2	-217,8	-280,2	-3,1	839,3	+39,3	+4,92
900	-23,24	224,40	502,97	-134,00	1028,4	0,0	66,8	63,1	45,7	155,3	-1,2	-25,0	-37,0	-26,5	-6,4	-118,0	37,1	-44,3	-224,4	-3,9	909,7	+9,7	+1,08
1000	-26,27	231,05	512,34	-138,55	1028,4	0,0	19,2	-64,7	-289,6	13,0	-0,7	-5,8	-9,6	-8,0	5,6	170,6	-7,4	136,2	60,5	-0,5	1047,4	+47,4	+4,74
1100	-28,30	233,07	519,36	-139,18	1028,4	0,0	-12,6	-103,5	-540,7	-6,7	-0,3	6,1	9,5	2,5	9,4	310,5	-17,2	273,6	163,7	0,0	1122,8	+22,8	+2,07
1200	-31,90	235,78	524,40	-144,18	1028,4	0,0	-69,2	-155,5	-721,4	-163,3	0,4	26,9	41,0	25,7	14,4	446,6	-52,3	373,6	428,2	3,9	1226,9	+26,9	+2,24
1300	-34,71	236,32	528,25	-144,06	1028,4	0,0	-113,2	-165,9	-859,1	-159,6	1,0	42,3	65,8	39,8	15,4	509,1	-54,1	450,5	467,3	3,8	1271,6	-28,4	-2,19
1400	-36,73	238,29	534,27	-146,20	1028,4	0,0	-144,9	-203,9	-1074,5	-226,8	1,5	54,7	85,8	52,8	19,1	639,0	-72,3	571,8	627,4	5,6	1363,6	-36,4	-2,60
1500	-39,14	238,35	539,26	-148,09	1028,4	0,0	-182,8	-205,0	-1253,1	-285,8	2,1	67,7	108,8	67,7	19,2	702,9	-82,8	673,5	766,2	7,1	1434,1	-65,9	-4,39

Fonte: Autor (2026).

Figura 44 – Tabela: Contribuições agrupadas por tipo de feature (kgf)

Carga (kgf)	Intercepto (b)	cte (x <sub>1</sub> )	Lineares (x <sub>2</sub> +x <sub>3</sub> +x <sub>4</sub> +x <sub>5</sub> )	Quadráticos (x <sub>6</sub> +x <sub>10</sub> +x <sub>13</sub> +x <sub>15</sub> )	Interações (x <sub>7</sub> ..x <sub>12</sub> ,x <sub>14</sub> )	Total (kgf)	Erro (%)
500	1028,4	0,0	3531,9	-1417,2	-2631,4	511,7	+2,33
600	1028,4	0,0	2674,7	-1026,1	-2080,2	596,8	-0,53
700	1028,4	0,0	1671,8	-643,2	-1361,2	695,8	-0,60
800	1028,4	0,0	700,1	-234,6	-654,6	839,3	+4,92
900	1028,4	0,0	330,9	-55,7	-393,8	909,7	+1,08
1000	1028,4	0,0	-322,0	140,7	200,3	1047,4	+4,74
1100	1028,4	0,0	-663,5	282,6	475,2	1122,8	+2,07
1200	1028,4	0,0	-1109,4	392,3	915,6	1226,9	+2,24
1300	1028,4	0,0	-1297,9	470,7	1070,3	1271,6	-2,19
1400	1028,4	0,0	-1650,1	598,0	1387,3	1363,6	-2,60
1500	1028,4	0,0	-1926,8	701,9	1630,5	1434,1	-4,39

Fonte: Autor (2026).

Figura 45 – Tabela: Termos que mais variam com a carga (os que efetivamente calibram)

Rank	Termo	Variacao (estd lnfl)	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
1	w4-z4 (FBG <sub>3</sub> )	1235,8	2734,3	1921,7	1152,6	374,0	45,7	-289,6	-540,7	-721,4	-859,1	-1074,5	-1253,1
2	w11-z11 (e <sub>3</sub> )	675,3	-1440,3	-966,3	-676,8	-314,1	-118,0	170,6	310,5	446,6	509,1	639,0	702,9
3	w13-z13 (FBG <sub>3</sub> )	636,7	-1371,2	-992,8	-616,5	-217,8	-44,3	136,2	273,6	373,6	450,5	571,8	673,5
4	w14-z14 (e <sub>3</sub> )	593,9	-1031,9	-968,3	-606,8	-280,2	-224,4	60,5	163,7	428,2	467,3	627,4	766,2
5	w3-z3 (FBG <sub>3</sub> )	206,6	439,3	251,8	214,6	128,6	63,1	-64,7	-103,5	-155,5	-165,9	-203,9	-205,0
6	w5-z5 (FBG <sub>3</sub> )	188,2	161,8	317,3	199,3	121,8	155,3	13,0	-6,7	-163,3	-159,6	-226,8	-285,8
7	w2-z2 (FBG <sub>3</sub> )	122,4	196,5	183,8	105,2	75,6	66,8	19,2	-12,6	-69,2	-113,2	-144,9	-182,8
8	w8-z8 (e <sub>3</sub> )	72,8	-118,8	-107,8	-66,0	-44,6	-37,0	-9,6	9,5	41,0	65,8	85,8	108,8
9	w12-z12 (e <sub>3</sub> )	63,3	98,3	92,8	68,4	42,2	37,1	-7,4	-17,2	-52,9	-54,1	-72,3	-82,8
10	w7-z7 (e <sub>3</sub> )	45,7	-73,4	-66,2	-41,1	-29,6	-25,0	-5,8	6,1	26,9	42,3	54,7	67,7

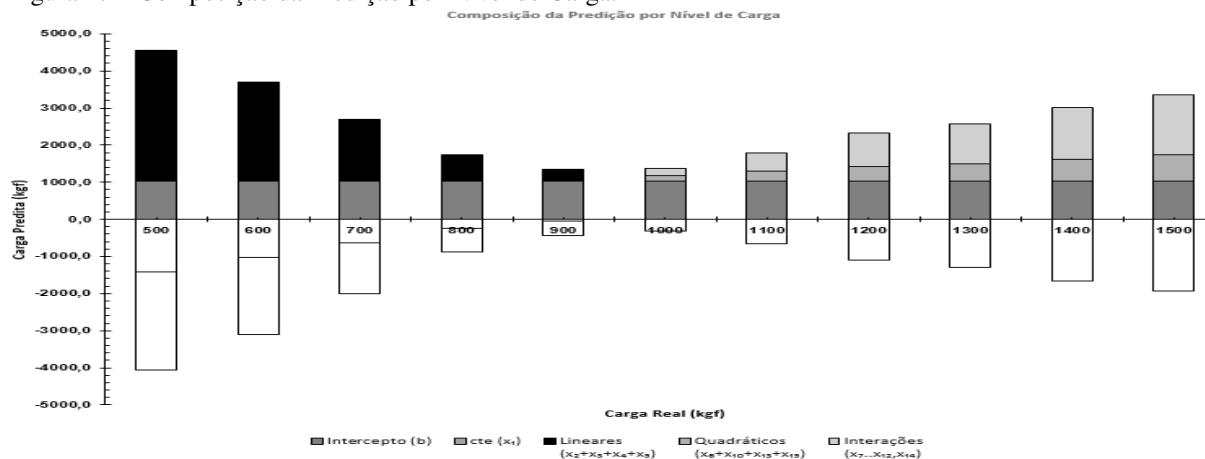
Fonte: Autor (2026).

Figura 46 – Nomeclatura utilizada

Nomenclatura:	
$x_i$ (i=1..15)	Feature polinomial – definida na Etapa 1 da aba Calculadora
$\mu_i, \sigma_i$	Média e desvio de $x_i$ nos dados de treino – Etapa 2
$z_i = (x_i - \mu_i) / \sigma_i$	Feature normalizada (padronizada)
$w_i$ (coeficiente)	Peso do modelo Ridge para o termo $i$ – coluna "Peso" na Etapa 2
Valor na tabela	Cada célula = $w_i \times z_i$ = contribuição do termo $x_i$ em kgf
$b$ (intercepto)	Constante base do modelo = 1028.43 kgf
Total	Carga (kgf) = $b + \sum(w_i \times z_i)$ para $i=1..15$

Fonte: Autor (2026).

Figura 47 – Composição da Predição por Nível de Carga.



Fonte: Autor (2026).