

## IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO ESTRUTURAL EM TRILHOS FERROVIÁRIOS UTILIZANDO UM VEÍCULO FERROVIÁRIO AO CREEM 2025-0145

Marcos Vinícius Ferreira Nasário, [nasario@unifesspa.edu.br](mailto:nasario@unifesspa.edu.br)<sup>1</sup>  
Tanaco Do Nascimento Lima, [Lima27.t@Unifesspa.edu.br](mailto:Lima27.t@Unifesspa.edu.br)<sup>1</sup>  
Antonio Leandro Castro da Paixão, [leoleandro@unifesspa.edu.br](mailto:leoleandro@unifesspa.edu.br)<sup>1</sup>  
Camila Gianini Gonzalez Bueno, [camila.gg.bueno@unesp.br](mailto:camila.gg.bueno@unesp.br)<sup>2</sup>  
Douglas Domingues Bueno, [douglas.bueno@unesp.br](mailto:douglas.bueno@unesp.br)<sup>2</sup>  
Pedro Christian Ayala Castillo, [Pedro.ayala@unifesspa.edu.br](mailto:Pedro.ayala@unifesspa.edu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. Instituto de Geociências e Engenharias, Folha 17, Quadra 04, Lote especial, Bairro: Nova Marabá – Marabá -PA, CEP: 68505- 080

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) - Campus de Ilha Solteira, Av. Brasil Centro, 56 - Ilha Solteira, SP - CEP 15.385-000

**Resumo** Este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema automatizado de Monitoramento de Integridade Estrutural (SHM) para trilhos ferroviários, com foco no modelo TR-68. O sistema será baseado em um carrinho ferroviário modelado, equipado com atuadores eletromecânicos para excitar o trilho e permitir a coleta de dados dinâmicos por meio de acelerômetros fixados, visando à detecção de falhas estruturais. A interação entre o carrinho, que acomoda os atuadores, e o trilho está sendo estudada no software Fusion 360. As coletas estão previstas para ocorrer com o carrinho estacionário: atuadores posicionados em direções vertical e horizontal foram modelados para representar impactos futuros, enquanto os acelerômetros deverão registrar os sinais resultantes. Embora o protótipo físico ainda não tenha sido desenvolvido, o projeto avançou até a modelagem e a simulação estática, fornecendo análises preliminares que fundamentam as fases subsequentes. Esses resultados contribuem para a futura construção do protótipo e para o aprimoramento da segurança e da manutenção preventiva das operações ferroviárias.

**Palavras chave:** Monitoramento de Integridade Estrutural (SHM), Trilhos Ferroviários, Sensores e Atuadores, Manutenção Preventiva.

**Abstract.** This project aims to develop an automated Structural Health Monitoring (SHM) system for railway tracks, focusing on the TR-68 model. The system will be based on a modeled railway cart equipped with electromechanical actuators to excite the rail and enable the collection of dynamic data through fixed accelerometers, with the objective of detecting structural failures. The interaction between the cart, which houses the actuators, and the rail is being studied using Fusion 360 software. Data collection is planned to occur with the cart in a stationary position: actuators placed in vertical and horizontal directions were modeled to represent future impacts, while the accelerometers are expected to record the resulting signals. Although the physical prototype has not yet been developed, the project has progressed through modeling and static simulation stages, providing preliminary analyses that will serve as a basis for subsequent phases. These results contribute to the future construction of the prototype and to the improvement of safety and preventive maintenance in railway operations.

**Keywords:** Structural Health Monitoring (SHM), Railway Tracks, Sensors and Actuators, Preventive Maintenance.

### 1. INTRODUÇÃO

A mineração desempenha um papel crucial na economia do estado do Pará, que se destaca como o segundo maior produtor mineral do Brasil. Em 2021, o estado foi responsável por aproximadamente 21% de toda a produção mineral nacional, com destaque para o minério de ferro, gerando um valor recorde de R\$ 145 bilhões, equivalente a 42% do total do país (Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Pará, 2023). Grande parte dessa produção é destinada à exportação, tornando o Pará o segundo maior exportador de minérios do Brasil em 2022, o que favorece diretamente a balança comercial e impulsiona o Produto Interno Bruto estadual (Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Pará, 2023). A logística dessa produção depende majoritariamente da Estrada de Ferro Carajás (EFC), com cerca de mil quilômetros de extensão entre Parauapebas (PA) e o porto de São Luís (MA), responsável pelo escoamento de mais

de 176 milhões de toneladas de minério em 2024 (Folha de S. Paulo, 2025). Dada a intensidade do tráfego de cargas pesadas e as exigências de confiabilidade, torna-se essencial garantir a integridade estrutural da via férrea para evitar falhas, descarrilamentos e interrupções nas operações logísticas.

Nesse contexto, o monitoramento da integridade estrutural, conhecido como *Structural Health Monitoring* (SHM), surge como uma estratégia tecnológica promissora. O SHM consiste no acompanhamento contínuo ou periódico das condições de uma estrutura, com uso de sensores, excitação mecânica e processamento de sinais para detectar, localizar e quantificar danos incipientes (Rezaei *et al.*, 2025). Aplicado à infraestrutura ferroviária, o SHM busca identificar fissuras por fadiga, desgastes localizados e deformações anômalas nos trilhos antes que evoluam para falhas críticas (Yang *et al.*, 2022).

O presente trabalho aborda o projeto de um sistema embarcado de monitoramento de integridade estrutural (*Structural Health Monitoring* – SHM) para trilhos ferroviários do tipo TR-68, por meio de modelagem e simulação no software Fusion 360. A estrutura adotada é um carrinho ferroviário leve, de plataforma plana (*flatbed*), modelado como estacionário sobre o trilho. No modelo estático, uma carga pontual de 100 kgf foi aplicada no centro da plataforma para representar o peso estimado dos componentes embarcados, etapa preliminar antes da realização de análises dinâmicas. Diferentemente de sistemas móveis ou baseados em veículos autônomos, optou-se por uma solução estacionária embarcada diretamente no trilho. Até o momento, não foram utilizados componentes eletrônicos físicos; sensores, atuadores e microcontroladores estão apenas em fase de planejamento.

Neste contexto, destacam-se sensores piezoelétricos e acelerômetros MEMS como tecnologias promissoras. Estudos recentes demonstram que acelerômetros MEMS podem substituir geofones convencionais em trilhos, mantendo desempenho equivalente a custos significativamente reduzidos (Shih *et al.*, 2024). Por exemplo, Shih *et al.* (2024) relataram o uso de acelerômetros MEMS montados em dormentes para capturar deslocamentos verticais do trilho, com resultados comparáveis aos de geofones. Em infraestrutura civil, Bedon *et al.* (2018) validaram sensores MEMS de baixo custo em testes de campo de uma ponte estaiada, avaliando sua capacidade de monitoramento contínuo. Além disso, Armijo *et al.* (2024) integraram sensores MEMS sem fio a um *gêmeo digital* para pontes ferroviárias, destacando a viabilidade de implantações em larga escala.

Quanto à aquisição e transmissão de dados, planeja-se o uso de microcomputadores como o Raspberry Pi e microcontroladores como o Arduino em sistemas distribuídos baseados em Internet das Coisas (IoT). Komarizadehasl *et al.* (2022a) propuseram o sistema LARA, combinando acelerômetros MEMS, Arduino e Raspberry Pi para aquisição e envio de dados. Buckley *et al.* (2021) desenvolveram um arranjo com sensores conectados a microcontroladores Arduino e comunicação via LoRa com um gateway Raspberry Pi. De modo similar, Alnabulsi *et al.* (2024) projetaram um sistema IoT para pontes com aquisição sem fio e envio de dados para análise. Essas abordagens evidenciam o potencial da computação de borda na implementação de sistemas de SHM de baixo custo.

Por fim, estudos recentes apontam o uso de ondas ultrassônicas guiadas como técnica eficaz para SHM em trilhos ferroviários. Chapuis *et al.* (2023) desenvolveram um sistema com transdutores piezoelétricos permanentes distribuídos ao longo da via e sincronização via GPS. Tais ondas podem se propagar por longas distâncias com baixa atenuação e alta sensibilidade a defeitos como trincas e corrosões. Yang *et al.* (2025) complementam ao destacar que essas técnicas têm aplicação consolidada em setores como aeroespacial, naval e ferroviário.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O monitoramento de integridade estrutural (SHM) tem por objetivo avaliar o desempenho e identificar o estado físico de estruturas em serviço Komarizadehasl *et al.* (2022b). No contexto ferroviário, sistemas de SHM buscam detectar fissuras e anomalias em trilhos (como o perfil TR-68) por meio da análise de vibrações e inspeções periódicas, antecipando intervenções de manutenção e evitando falhas. A análise contínua desses dados viabiliza a detecção precoce de danos e o planejamento de ações corretivas.

### 2.1 Sensores Piezoelétricos e Acelerômetros MEMS

Sensores piezoelétricos convertem deformações mecânicas da estrutura em sinais elétricos por meio do efeito piezoelétrico, permitindo monitorar deformações e vibrações locais Ju *et al.* (2023). Esses dispositivos podem operar em modo passivo ou ativo, sendo empregados em técnicas como emissão acústica e propagação de ondas guiadas. Já os acelerômetros MEMS medem aceleração a partir da deflexão de uma massa de prova micromecânica, fabricada por processos de microeletrônica, o que garante baixo custo, miniaturização e baixo consumo de energia. O uso combinado desses sensores fornece informações complementares sobre a integridade do trilho, associando a sensibilidade a ondas de alta frequência dos piezoelétricos com a medição precisa de vibrações globais pelos MEMS.

## 2.2 Atuador de Impacto Eletromecânico

A excitação mecânica controlada é uma técnica empregada em sistemas de monitoramento baseados em vibração, pois permite a análise dinâmica da estrutura em condições repetíveis. Atuadores eletromagnéticos destacam-se por oferecer acionamento direto, resposta rápida e fácil controle por pulsos elétricos. Esses dispositivos são constituídos, em geral, por uma bobina e um núcleo móvel (êmbolo) de ferro, que é impulsionado linearmente quando energizado, retornando em seguida por ação de mola ou gravidade.

Em aplicações de *Structural Health Monitoring* (SHM), os atuadores vêm sendo explorados como fontes de excitação de banda larga. Tcherniak and Mølgaard (2017) demonstraram o uso de um atuador de impacto aplicado em uma turbina eólica Vestas V27 em operação, com o objetivo de detectar alterações modais associadas a danos estruturais. De modo semelhante, Jannifar *et al.* (2017) desenvolveram um sistema de excitação por impacto automatizado para Análise Modal Experimental (EMA) em campo, garantindo repetibilidade e precisão nos testes dinâmicos. Já Razi *et al.* (2013) aplicaram técnicas semelhantes no monitoramento de flanges de dutos pressurizados.

Atualmente, há também soluções comerciais, como o *Electric Impact Hammer* modelo 086P92-ES da The Modal Shop, Inc. (2025), que utiliza um mecanismo para fornecer impactos calibrados com repetibilidade e controle sobre a amplitude de excitação, sendo empregado em testes estruturais. Inspirado nessas abordagens, o presente trabalho modela um atuador linear tipo solenoide, projetado para gerar impulsos mecânicos padronizados em trilhos ferroviários TR-68, com o objetivo de simular ensaios de excitação estruturada e coleta de resposta vibracional.

## 2.3 Aquisição de Dados e Integração com IoT

O sistema de aquisição de dados será gerenciado por um microcomputador como o Raspberry Pi, em conjunto com microcontroladores como o Arduino, permitindo a coleta, o processamento e a transmissão de informações em tempo real. Dispositivos dessa natureza são utilizados em aplicações de SHM devido ao seu baixo custo, versatilidade e compatibilidade com tecnologias de Internet das Coisas (IoT) (Bhatta and Dang, 2024). Essa abordagem possibilita a transmissão remota dos dados para servidores, a sincronização entre sensores e a análise contínua da integridade estrutural da via.

## 3. METODOLOGIA

Este trabalho contempla o desenvolvimento conceitual, a modelagem CAD e a simulação estática preliminar de um sistema embarcado de monitoramento de integridade estrutural (SHM) aplicado a trilhos ferroviários do tipo TR-68. A proposta baseia-se em um veículo ferroviário estacionário com estrutura tipo plataforma plana. Até o momento, não houve fabricação ou ensaio físico de componentes; todas as etapas foram conduzidas em ambiente computacional por meio do software Autodesk Fusion 360. A Fig. 1 apresenta o fluxograma da metodologia aplicada.

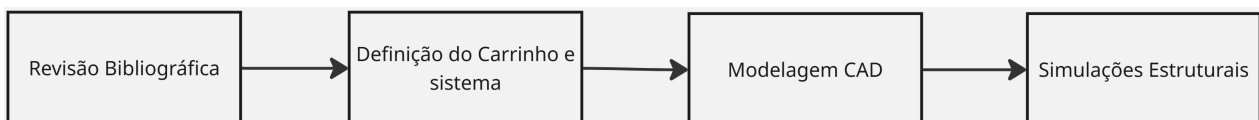


Figura 1: Fluxograma da metodologia do sistema de monitoramento estrutural em trilhos ferroviários.

No ambiente CAD, foi modelado o veículo ferroviário adaptado ao perfil TR-68, com rodas apoiadas em mancais cilíndricos. Para representar os componentes embarcados (sensores, atuador, fonte de alimentação), aplicou-se uma carga estática de 100 kgf (aproximadamente 981 N) no centro da plataforma.

Também foi modelado um atuador eletromecânico simplificado, inspirado em um solenoide linear, com dois cenários de posicionamento: verticalmente sobre o boleto do trilho e horizontalmente na alma, conforme ilustrado na Fig. 2. Esse componente foi modelado apenas de forma conceitual, representando futuros impulsos mecânicos repetitivos que, em uma implementação física, podem substituir martelos de impacto instrumentados como fonte de excitação dinâmica.



Figura 2: Visão frontal do carrinho com representação da atuação do atuador.

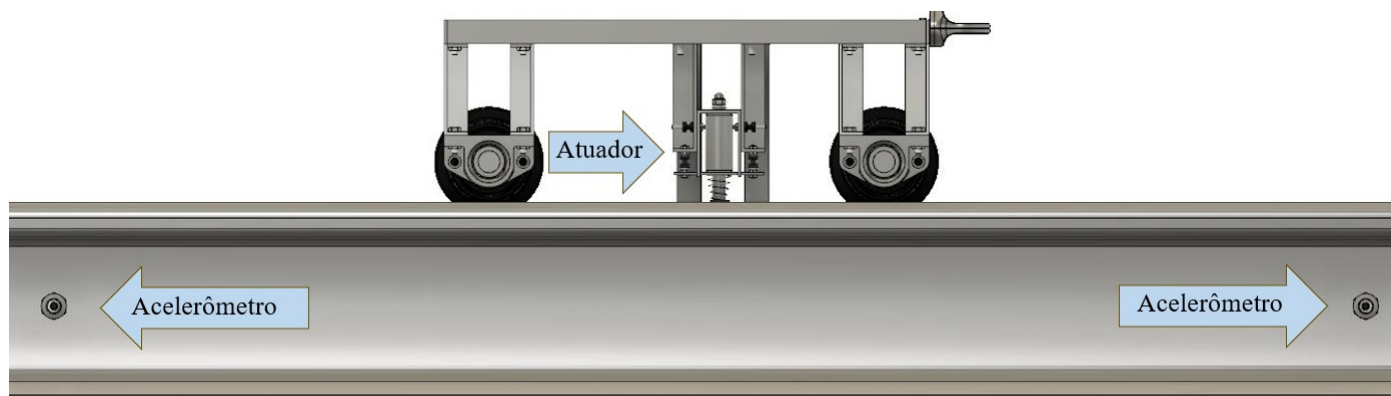


Figura 3: Visão lateral do carrinho.

### 3.1 Modelagem CAD do Veículo Ferroviário Estacionário

- **Estrutura e geometria:** criado no Fusion 360 um carrinho tipo plataforma plana (*flatbed*), modelado como estacionário sobre o trilho TR-68 (bitola de 1,6 m), composto por perfis metálicos retangulares e chapas leves, com projeto modular e desmontável, conforme a Fig. 3.
- **Interface trilho-veículo:** as rodas foram modeladas para se acoplarem ao perfil TR-68, com mancais de apoio e contato idealizado, assumindo atrito suficiente para estabilidade, mas sem permitir deslocamento durante a simulação.
- **Carga representativa:** aplicou-se uma carga estática de 100 kgf no centro da plataforma, para representar o peso estimado dos dispositivos embarcados no protótipo ou outros equipamentos que possam ser instalados.
- **Estudo de tensões:** realizou-se uma análise de elementos finitos (FEA) no Fusion 360, utilizando o critério de von Mises para avaliar a distribuição de tensões e deslocamentos na estrutura.

### 3.2 Planejamento do Sistema Embarcado

Embora ainda não tenha sido implementado fisicamente, definiu-se a arquitetura lógica do sistema SHM:

- **Sensores virtuais:** no modelo CAD, foram representados acelerômetros do tipo MEMS posicionados em regiões do trilho, como mostrado na Fig. 3.
- **Atuador virtual:** modelou-se um atuador linear com estrutura de suporte para fixação ao carrinho e uso de elementos elásticos (como buchas ou coxins) para atenuar a transmissão de vibração à estrutura conforme a Fig. 4.
- **Aquisição e controle:** foi previsto um nó central baseado em microcomputador (Raspberry Pi 4B), responsável pela geração do sinal de excitação (acionamento do atuador), coleta de dados dos sensores e envio para uma plataforma web via conexão sem fio (Wi-Fi ou 4G).

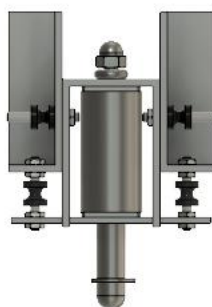


Figura 4: Visão frontal do atuador.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resumo dos dados de simulação

O modelo tridimensional do carrinho ferroviário foi analisado no *Autodesk Fusion 360* com malha refinada, assegurando adequada representação geométrica e numérica. As condições de contorno e a aplicação das cargas garantiram estabilidade do modelo e eliminaram movimentos não físicos, permitindo comparações consistentes entre os dois cenários avaliados: Simulação A (carga pontual de 50 kgf) e Simulação B (carga pontual de 100 kgf).

Na primeira análise (Simulação A), aplicou-se uma carga estática de 50 kgf (490 N) sobre o centro da plataforma. Os resultados indicaram uma tensão de von Mises máxima de 39,43 MPa, inferior ao limite de escoamento típico do aço (207–240 MPa), mantendo o regime elástico. O fator de segurança mínimo foi de 5,25, valor acima do intervalo usual do projeto (fica entre 2 a 4), sugerindo que a estrutura está superdimensionada para esse carregamento. O deslocamento máximo de 0,988 mm, embora pequeno, pode interferir em acoplamentos sensíveis de sensores, recomenda-se avaliar fixações mais rígidas ou elementos de amortecimento.

Na segunda análise (Simulação B), a carga foi duplicada para 100 kgf (981 N), mantida no centro da plataforma. A tensão de von Mises máxima atingiu 78,85 MPa, ainda inferior ao limite de escoamento, e o deslocamento máximo foi de 1,98 mm no eixo Z. Também foram registradas pressão de contato máxima de 40,99 MPa e deformação equivalente de  $7,12 \times 10^{-4}$ . O fator de segurança mínimo reduziu para 2,63, valor dentro do intervalo recomendado de 2 a 4, confirmando que a estrutura permanece segura, embora mais próxima do limite. Esses resultados indicam que a estrutura é capaz de suportar o dobro da carga inicial projetada, mas reforçam a necessidade de avaliar reforços estruturais em cenários futuros que envolvam cargas adicionais, como a integração de motores ou sistemas embarcados mais pesados. A Fig. 5 apresenta a comparação visual dos deslocamentos e das tensões de von Mises para os dois casos analisados.

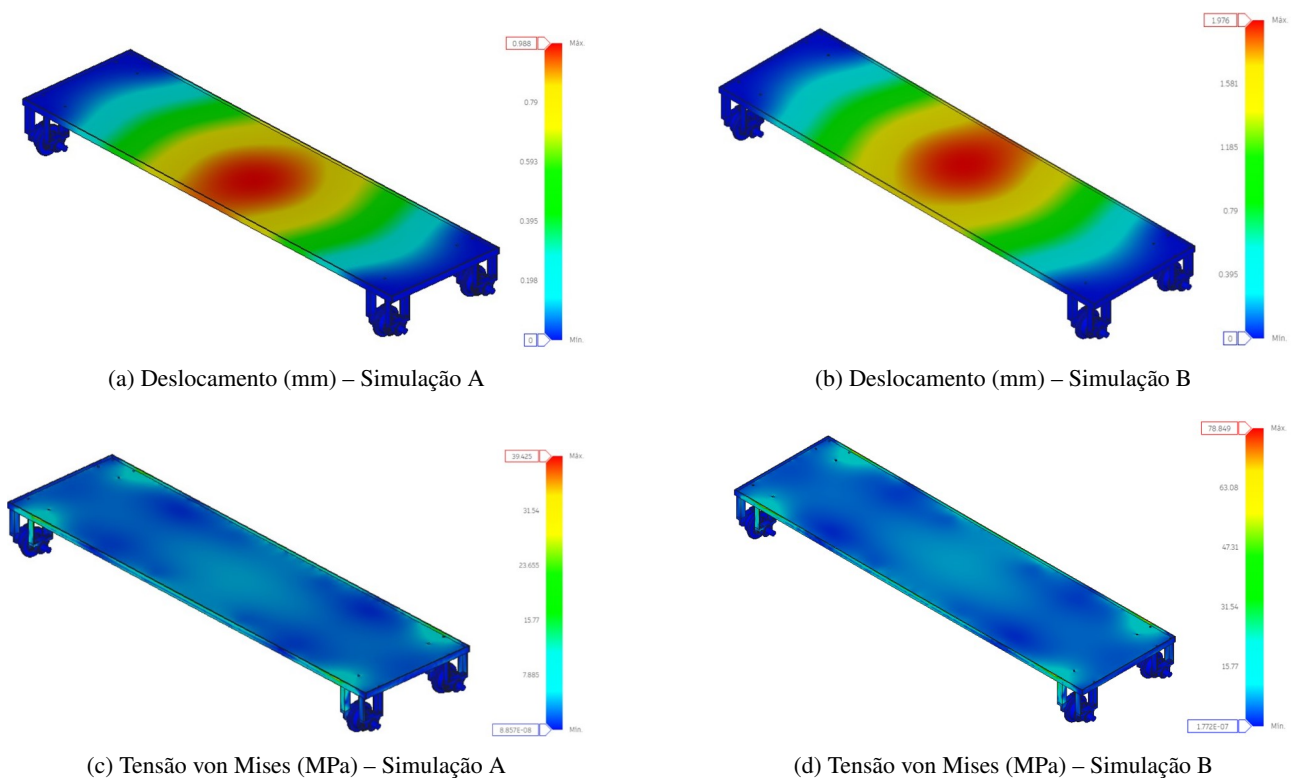


Figura 5: Comparação entre os resultados das simulações A e B para deslocamento, tensão de von Mises

De forma geral, a Simulação A apresentou menores valores absolutos de tensão e deslocamento, mas indicou superdimensionamento da estrutura, enquanto a Simulação B representou uma condição mais realista de operação, com fator de segurança adequado. Em ambos os casos, as tensões permaneceram bem abaixo do limite de escoamento do material, o que sugere a possibilidade de empregar, em futuros protótipos, materiais alternativos de menor custo. Como próximos passos, recomenda-se a realização de análises modais e simulações dinâmicas (transientes e harmônicas), bem como a inclusão da massa e rigidez dos atuadores e sensores no modelo, a fim de prever corretamente o acoplamento estrutural no sistema SHM.

## 4.2 Implicações para o Projeto SHM

Os resultados estruturais obtidos indicam que o carrinho apresenta potencial para servir como base de integração de um sistema embarcado de SHM. A baixa deformação e a rigidez da plataforma sugerem condições adequadas para a instalação de sensores e atuadores, favorecendo a estabilidade das medições dinâmicas. Nesse cenário, a estrutura modelada demonstra viabilidade para receber acelerômetros e dispositivos de impacto eletromecânicos sem comprometer sua integridade, permitindo futuramente a coleta de sinais destinados à detecção de falhas no trilho. Além disso, a arquitetura estacionária do carrinho tende a facilitar a incorporação de microcontroladores e módulos de comunicação, alinhando o protótipo às perspectivas de sistemas conectados e à Internet das Coisas (IoT).

Dessa forma, os resultados numéricos da simulação estática funcionam como base preliminar para futuras validações experimentais do sistema SHM embarcado. Como próximos passos, destacam-se a realização de análises modais e harmônicas para investigar o comportamento dinâmico do sistema, a integração de atuadores e sensores reais para validação experimental e, por fim, ajustes estruturais voltados à otimização de peso sem comprometimento da robustez.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento conceitual, a modelagem computacional e a simulação preliminar de um sistema embarcado para monitoramento de integridade estrutural (SHM) em trilhos ferroviários do tipo TR-68, utilizando um veículo ferroviário estacionário de plataforma plana. A proposta visa contribuir com estratégias de manutenção preventiva na malha ferroviária, por meio da futura integração de sensores e atuadores em um sistema de aquisição embarcado.

A modelagem tridimensional realizada no ambiente CAD Autodesk Fusion 360 permitiu validar geometricamente o projeto do veículo e simular o carregamento estrutural representativo de componentes embarcados. A análise por elementos finitos indicou que a estrutura apresenta elevada rigidez, com fatores de segurança de 5,25 (para 50 kgf) e 2,63 (para 100 kgf), ambos dentro de condições aceitáveis de projeto. Esses resultados confirmam a viabilidade mecânica do modelo proposto e fornecem base para a evolução do protótipo.

Também foi proposto o planejamento de integração de sensores acelerômetros MEMS e de um atuador linear, posicionados de forma a simular excitações mecânicas repetitivas no trilho. Embora os componentes eletrônicos ainda não tenham sido implementados fisicamente, foi sugerido um esquema lógico preliminar de aquisição e controle, envolvendo microcontrolador e possibilidade de comunicação via IoT.

Como trabalhos futuros, destaca-se a construção do protótipo físico, a realização de análises dinâmicas (modais e harmônicas), a implementação dos sensores e do atuador, e a execução de testes experimentais para validar a eficácia do sistema na detecção de anomalias estruturais. Espera-se que essa abordagem contribua para o avanço de soluções modulares, de baixo custo e aplicáveis em ferrovias que operam sob condições críticas de carregamento e demanda logística.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam manifestar seu agradecimento à Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Pará (FAPESPA) por apoiarem esse trabalho no âmbito da Chamada Pública – Nº 005/2022 – FAPESPA / FAPESP. - FOMENTO À PESQUISA COLABORATIVA ENTRE FAPESPA E FAPESP e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo. Nº. 2022/10174-5 e a Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA). Agradecer ao grupo de pesquisa SIPROMEC-UNIFESSPA

## 7. REFERÊNCIAS

- Alnabulsi, A., Alfadhli, A. and Abdullah, W., 2024. "Development of iot-based structural health monitoring system for highway bridges using low-power wireless sensors". *Applied Sciences*, Vol. 14, No. 2, p. 77. doi: 10.3390/app14020077.
- Armijo, J., Sousa, H., Ribeiro, D. and Calçada, R., 2024. "Integration of low-cost mems sensors into digital twins for railway bridge monitoring". *Sensors*, Vol. 24, No. 5, p. 1723. doi:10.3390/s24051723.
- Bedon, C., Raciti Castelli, M. and Galvanetto, U., 2018. "Use of mems accelerometers for structural health monitoring of cable-stayed bridges". *Engineering Structures*, Vol. 175, pp. 618–631. doi:10.1016/j.engstruct.2018.08.063.
- Bhatta, S. and Dang, J., 2024. "Use of iot for structural health monitoring of civil engineering structures: a state-of-the-art review". *Urban Lifeline*, Vol. 2, p. 17. doi:10.1007/s44285-024-00031-2.
- Buckley, A., Dillon, C., Malekjafarian, A. and O'Brien, E., 2021. "Edge-shm: An energy efficient wireless system for long-term bridge monitoring using mems sensors and lora communication". *Sensors*, Vol. 21, No. 5, p. 1623. doi:10.3390/s21051623.
- Chapuis, B., Henault, J.M., Richard, A. and Duhamel, D., 2023. "Continuous monitoring of railway tracks using ultrasonic

- guided waves and synchronized piezoelectric transducers”. *Structural Health Monitoring*, Vol. 22, No. 1, pp. 8–24. doi:10.1177/14759217221128665.
- Folha de S. Paulo, 2025. “Ferrovia carajás amplia uso de biodiesel e adotará trens híbridos”. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2025/06/ferrovia-carajas-amplia-uso-de-biodiesel-e-adotara-trens-hibridos.shtml>. Acesso em: 18 jun. 2025.
- Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Pará, 2023. “Boletim da mineração 2023 reforça a importância da produção mineral paraense no cenário nacional”. Disponível em: <https://www.fapespa.pa.gov.br/2023/09/11/boletim-da-mineracao-2023-reforca-importancia-da-producao-mineral-paraense-no-cenario/>. Acesso em: 5 maio 2025.
- Jannifar, A., Zubir, M.N.M. and Kazi, S.N., 2017. “Development of a new driving impact system to be used in experimental modal analysis (ema) under operational condition”. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 263, pp. 398–414. doi:10.1016/j.sna.2017.07.010.
- Ju, M., Dou, Z., Li, J.W., Qiu, X., Shen, B., Zhang, D., Yao, F.Z., Gong, W. and Wang, K., 2023. “Piezoelectric materials and sensors for structural health monitoring: Fundamental aspects, current status, and future perspectives”. *Sensors*, Vol. 23, No. 1, p. 543. doi:10.3390/s23010543.
- Komarizadehasl, S., Nasrollahi, M., Lucchini, A. and Malekjafarian, A., 2022a. “Lara: A low-cost autonomous system for railway bridge monitoring using mems sensors”. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, Vol. 12, No. 3, pp. 525–538. doi:10.1007/s13349-022-00541-y.
- Komarizadehasl, S., Lozano, F., Lozano-Galant, J.A., Ramos, G. and Turmo, J., 2022b. “Low-cost wireless structural health monitoring of bridges”. *Sensors*, Vol. 22, No. 15, p. 5725. doi:10.3390/s22155725.
- Razi, P., Esmaeel, R.A. and Taheri, F., 2013. “Improvement of a vibration-based damage detection approach for health monitoring of bolted flange joints in pipelines”. *Structural Health Monitoring*, Vol. 12, No. 3, pp. 207–224. doi:10.1177/1475921713479641.
- Rezaei, M., Eck, S., Fichtenbauer, S., Maierhofer, J., Klambauer, R., Bergmann, A., K"unstner, D., Velic, D. and G"anser, H.P., 2025. “Real-time detection and quantification of rail surface cracks using surface acoustic waves and piezoelectric patch transducers”. *Sensors*, Vol. 25, No. 10, p. 3014. doi:10.3390/s25103014.
- Shih, Y.T., Lee, W.T., Hsiao, Y.C. and Lien, W.H., 2024. “Evaluation of mems accelerometers as alternatives to geophones for monitoring vertical displacement of railway tracks”. *Sensors*, Vol. 24, No. 3, p. 642. doi:10.3390/s24030642.
- Tcherniak, D. and Mølgaard, L.L., 2017. “Active vibration-based shm system demonstration on an operating vestas v27 wind turbine”. <https://www.bksv.com/media/doc/bn1265.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2025.
- The Modal Shop, Inc., 2025. “Electric impact hammer (model 086p92-es)”. URL <https://www.modalshop.com/vibration-test/products/accessories/electric-impact-hammer>. Accessed: 2025-06-22.
- Yang, C., Lin, Q., Wang, Z. and Yan, X., 2022. “Detection of transverse cracks in rail base using piezoelectric sensor arrays and guided ultrasonic waves”. *Sensors*, Vol. 22, No. 21, p. 8423. doi:10.3390/s22218423.
- Yang, X., Zhao, Y., Wang, H. and Wu, B., 2025. “Guided ultrasonic wave-based structural health monitoring: A review of applications in aerospace, civil and rail industries”. *Ultrasonics*, Vol. 137, p. 106527. doi:10.1016/j.ultras.2023.106527.

## 8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.