

ORGANIZADORES

Vanusca Dalosto Jahno

Marco Antônio Siqueira Rodrigues

Fernando Dal Pont Morisso

Carlos Leonardo Pandolfo Carone

APLICAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS EM FIXAÇÕES FERROVIÁRIAS

VALE

UNIVERSIDADE FEEVALE

pimenta cultural



ORGANIZADORES

Vanusca Dalosto Jahno

Marco Antônio Siqueira Rodrigues

Fernando Dal Pont Morisso

Carlos Leonardo Pandolfo Carone

APLICAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS EM FIXAÇÕES FERROVIÁRIAS

VALE

UNIVERSIDADE FEEVALE

pimenta cultural

2026

São Paulo

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)

A642

Aplicação de materiais poliméricos em fixações ferroviárias / Organização Vanusca Dalosto Jahno... [et al.]. – São Paulo: Pimenta Cultural, 2025.

Demais colaboradores: Marco Antônio Siqueira Rodrigues, Fernando Dal Pont Morisso, Carlos Leonardo Pandolfo Carone.

Livro em PDF

ISBN 978-85-7221-604-3
DOI 10.31560/pimentacultural/978-85-7221-604-3

1. Fixações Ferroviárias. 2. Resíduos Poliméricos. 3. Isoladores. 4. Palmilhas. 5. Sustentabilidade. I. Jahno, Vanusca Dalosto (Org.). II. Título.

CDD: 625.1

Índice para catálogo sistemático:
I. Engenharia Ferroviária
Simone Sales • Bibliotecária • CRB: ES-000814/O

EXPEDIENTE

Copyright © Pimenta Cultural, alguns direitos reservados.

Copyright do texto © 2026 os autores e as autoras.

Copyright da edição © 2026 Pimenta Cultural.

Esta obra é licenciada por uma Licença Creative Commons:
Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional - (CC BY-NC-ND 4.0).
Os termos desta licença estão disponíveis em:
<https://creativecommons.org/licenses/>.
Direitos para esta edição cedidos à Pimenta Cultural.
O conteúdo publicado não representa a posição oficial da Pimenta Cultural.

Direção editorial	Patricia Bieging Raul Inácio Busarello
Editora executiva	Patricia Bieging
Gerente editorial	Landressa Rita Schiefelbein
Assistente editorial	Ana Flávia Pivisan Kobata Júlia Marra Torres
Diretor de criação/projeto gráfico	Raul Inácio Busarello
Assistente de arte	Naiara Von Groll
Editoração eletrônica	Stela Tiemi Hashimoto Kanada
Imagens da capa	titiankencana, vectorstockstuff - Freepik.com
Tipografias	Acumin, Sofia Pro
Revisão	Landressa Rita Schiefelbein
Organizadores	Vanusca Dalosto Jahno Marco Antônio Siqueira Rodrigues Fernando Dal Pont Morisso Carlos Leonardo Pandolfo Carone

PIMENTA CULTURAL
São Paulo • SP
+55 (11) 96766 2200
livro@pimentacultural.com
www.pimentacultural.com

pimenta® cultural
2026

EXPEDIENTE

SUMÁRIO

Apresentação **8**
Prof.a Dr.a Vanusca Dalosto Jahno

Introdução **10**
Luciano Oliveira
Iara Melo

Referências 12

CAPÍTULO **1**
Caracterização dos Componentes Poliméricos das Fixações Ferroviárias **13**
Francieli Albani
Fernando Dal Pont Morisso

Introdução 14

Sistemas de fixação ferroviária 14

Estudos do envelhecimento e caracterização em polímeros usados em sistemas de fixação de ferrovia 16

Metodologia de caracterização 18

Microscopia óptica (MO) 20

Microscopia eletrônica de varredura (MEV) 20

Espectrometria por infravermelho com transformada de fourier (FTIR) 21

Análise termogravimétrica (TGA) 21

Calorimetria diferencial de varredura (DSC) 22
Análise dinâmico-mecânica (DMA) 22
Ensaio de resistência à tração e deformação 22
Dureza 23
Resultados e discussão sobre desempenho em condições reais 23
Microscopia óptica (MO) 23
Microscopia eletrônica de varredura 24
Espectrometria por infravermelho com transformada de fourier (FTIR) 26
Análise termogravimétrica (TGA) 30
Calorimetria diferencial de varredura (DSC) 31
Análise dinâmico-mecânico (DMA) 33
Ensaio de resistência à tração e alongamento na ruptura 37
Ensaio de dureza 39
Considerações finais 41
Referências 42

CAPÍTULO **2**
Isoladores frontais e laterais dosistema de fixação *Fastclip* 45
Cheila Viegas
Luana Graziela Adam
Fernando Dal Pont Morisso
Marco Antônio Siqueira Rodrigues

Introdução 46

Composição dos isoladores frontais e laterais 49

Propriedades dos isoladores
frontais e laterais de poliamida 66
e dos polímeros alternativos 57

Resultados dos testes nos isoladores
frontais e laterais de PA66 e dos corpos
de prova dos polímeros alternativos injetados 61

Geometria dos isoladores frontais e laterais 64

Isolador frontal 65

Isolador lateral 67

Nova geometria dos isoladores laterais 71

Ensaios de desgaste acelerado 73

Considerações finais 75

Isoladores frontais e laterais atuais
e polímeros alternativos 75

Geometria dos isoladores frontais e laterais 75

Referências 76

CAPÍTULO **3**

Palmilhas amortecedoras, ou *railpads* 81

Cátia Dulcinéia Francisco Klein
Carlos Leonardo Pandolfo Carone
Vanusca Dalosto Jahno

Introdução 82

Elastômeros 84

Elastômeros termofixos 86
Elastômeros termoplásticos 87
Vulcanização 88
Considerações finais 90
Referências 90

Sobre os autores e as autoras 94

APRESENTAÇÃO

Prof.a Dr.a Vanusca Dalosto Jahno[1]

A crescente demanda por sistemas de transporte ferroviário mais eficientes e duráveis tem impulsionado o desenvolvimento de soluções técnicas voltadas à melhoria dos componentes estruturais da infraestrutura das ferrovias. Nesse contexto, o presente e-book reúne uma análise aprofundada sobre os materiais poliméricos empregados nas fixações ferroviárias, com ênfase nas palmilhas (*railpads*) utilizadas em dormentes nas ferrovias brasileiras. O conteúdo é resultado de uma pesquisa aplicada que investiga o comportamento físico-químico, térmico e mecânico desses materiais em condições reais de uso.

O e-book *Aplicação de materiais poliméricos em fixações ferroviárias* apresenta inicialmente o panorama dos sistemas de fixação, suas funções estruturais e a relevância do desempenho dos componentes poliméricos para a integridade das linhas férreas. Em seguida, são detalhadas as metodologias de caracterização utilizadas para analisar as propriedades dos materiais, abrangendo técnicas de espectroscopia, calorimetria, análise termogravimétrica, microscopia e ensaios mecânicos. A escolha dessas ferramentas analíticas visa compreender o processo de degradação dos materiais quando submetidos a esforços cíclicos, variações térmicas e exposição ambiental.

1 Coordenadora do Projeto "Desenvolvimento de Fixações Ferroviárias em Polímero" pela Cátedra Under Rail da Vale S.A. com a Universidade Feevale (Novo Hamburgo-RS, Brasil).

Os capítulos centrais trazem os resultados obtidos a partir de amostras reais coletadas na Estrada de Ferro Carajás (EFC) e na Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), fornecendo uma perspectiva prática sobre a durabilidade dos materiais em situações operacionais intensas. Comparações entre materiais novos e usados, bem como entre diferentes formulações de poliuretano e poliamida, revelam as implicações do envelhecimento nas propriedades estruturais das palmilhas. Essa abordagem proporciona subsídios importantes para a tomada de decisões na engenharia de manutenção ferroviária e no desenvolvimento de novos compostos.

Complementando a análise experimental, o e-book oferece uma discussão crítica dos resultados, em comparação com a literatura científica, considerando estudos nacionais e internacionais sobre envelhecimento e desempenho de polímeros na via permanente ferroviária. A integração entre teoria e prática confere à obra um caráter técnico-científico, alinhado às necessidades das operadoras ferroviárias, instituições de ensino e pesquisa, e indústrias de materiais ferroviários.

Destinado a engenheiros, pesquisadores, especialistas em materiais e profissionais da área ferroviária, este e-book pretende contribuir para o avanço do conhecimento na área de tecnologias poliméricas aplicadas aos sistemas de via permanente ferroviária. Ao promover a compreensão dos mecanismos de degradação e a importância da escolha adequada dos materiais, esta publicação reforça o papel estratégico da ciência dos materiais na construção de soluções ferroviárias mais seguras, eficientes e sustentáveis.

INTRODUÇÃO

Luciano Oliveira[2]

Iara Melo[3]

O Brasil vive um momento de renovação e expansão das ferrovias, impulsionado pela necessidade de aumentar a eficiência logística e reduzir os custos no transporte de cargas em longas distâncias. De acordo com o Plano Nacional de Logística (PNL 2035), a participação do modal ferroviário deve dobrar na matriz de transportes do Brasil, refletindo o avanço de novos investimentos públicos e privados em infraestrutura e inovação. Esse movimento acompanha a tendência internacional observada em países como China e Índia, onde o uso intensivo de tecnologias construtivas e de novos materiais tem transformado a confiabilidade e o desempenho das ferrovias.

Entre as empresas que protagonizam essa modernização, a Vale S.A. ocupa posição de destaque. Suas ferrovias – Estrada de Ferro Carajás (EFC) e Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) – figuram entre as mais produtivas do Brasil em toneladas transportadas por quilômetro útil, sendo fundamentais para o escoamento de minério, combustíveis e produtos siderúrgicos, além do transporte regular de passageiros. Essas ferrovias operam sob altas cargas por eixo e intensos volumes de transporte, exigindo elevado desempenho e

2 Mestre em Engenharia de Transportes. Engenheiro especialista em via permanente ferroviária na Engenharia de Ferrovias da Vale S.A. e líder técnico da Cátedra Under Rail.
E-mail: oliveira.luciano@vale.com

3 Mestranda em Engenharia de Transportes. Engenheira sênior em pesquisa e desenvolvimento de ferrovias na Engenharia da EFC – Vale S.A., gestora e líder técnica de projetos P&D na Vale S.A.
E-mail: iara.melo@vale.com

durabilidade dos componentes da via permanente. A confiabilidade e a segurança operacional dependem diretamente da qualidade técnica dos trilhos, dormentes, fixações e do pavimento ferroviário, além da capacidade de inovação tecnológica sustentada por parcerias com universidades e centros de pesquisa.

A Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) é um dos pilares estratégicos da engenharia ferroviária moderna. A Vale S.A. tem atuado de forma consistente em projetos colaborativos com instituições de referência em ensino e pesquisa, fomentando estudos aplicados sobre durabilidade, sustentabilidade e otimização do desempenho estrutural. No contexto da Cátedra Under Rail, por exemplo, vêm sendo desenvolvidos projetos de alto impacto voltados à avaliação e ao aprimoramento de fixações ferroviárias com materiais poliméricos, associando ganhos de desempenho à redução de falhas, custos de manutenção e mitigação de impactos ambientais.

As fixações ferroviárias constituem um dos elementos mais importantes e críticos da superestrutura da via permanente ferroviária. Sua função principal é garantir a adequada fixação dos trilhos aos dormentes, assegurando o desempenho dinâmico da via permanente. A evolução tecnológica das fixações acompanhou a transição dos sistemas rígidos de pregos de linha e retensores para modelos elásticos modernos, compostos por grampos de aço mola combinados com palmilhas e isoladores de material polimérico, capazes de reduzir tensões de contato e ampliar a durabilidade do conjunto.

O emprego de materiais poliméricos em fixações ferroviárias representa um avanço significativo na engenharia ferroviária. Polímeros de engenharia, como poliuretanos e poliamidas reforçadas com fibras, apresentam resiliência, resistência à fadiga e estabilidade térmica, mantendo propriedades elásticas sob cargas dinâmicas repetitivas. Conforme demonstrado por estudos de engenharia de materiais, o desempenho desses compostos resulta da correlação entre processamento, estrutura, propriedades e desempenho, permitindo

a adequação das características de resiliência às condições específicas das ferrovias.

O presente trabalho apresenta uma estrutura didática e progressiva, que aborda de forma integrada as características físico-químicas e mecânicas dos materiais poliméricos aplicados em fixações ferroviárias, os métodos experimentais utilizados na avaliação de desempenho, bem como os resultados obtidos em ensaios laboratoriais e em aplicações reais nas ferrovias EFC e EFVM. Além disso, são apresentadas recomendações técnicas e perspectivas futuras.

Este trabalho, fruto da colaboração entre a Vale S.A. e a Universidade Feevale, reafirma o compromisso com a pesquisa aplicada, a sustentabilidade e a inovação tecnológica – pilares essenciais para o futuro das ferrovias brasileiras e para o fortalecimento da engenharia ferroviária nacional.

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Plano Nacional de Logística** – PNL 2035. Brasília: Ministério de Infraestrutura, 2021.



1

Francieli Albani
Fernando Dal Pont Morisso

CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES POLIMÉRICOS DAS FIXAÇÕES FERROVIÁRIAS

INTRODUÇÃO

A durabilidade e o desempenho das vias férreas são diretamente influenciados pelos materiais utilizados nas fixações ferroviárias. As fixações, que incluem componentes poliméricos como as palmilhas (*railpads*), são responsáveis por garantir a integridade da superestrutura e minimizar os impactos da passagem de trens sobre a ferrovia. Esses materiais devem ser resistentes ao desgaste, à abrasão e às condições ambientais, como a exposição à luz UV e às variações de temperatura.

No contexto da Estrada de Ferro Carajás (EFC) e da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), o uso intensivo das linhas férreas gera desgaste prematuro dos componentes. A correta caracterização dos polímeros utilizados, como poliuretanos (PU) e poliamidas (PA6), é essencial para prolongar a vida útil desses componentes e reduzir a necessidade de manutenção e substituição frequentes.

Este capítulo busca apresentar as principais técnicas de caracterização aplicadas aos polímeros utilizados nas fixações ferroviárias e discutir os resultados obtidos em condições reais de uso.

SISTEMAS DE FIXAÇÃO FERROVIÁRIA

Os sistemas de fixação ferroviária são fundamentais para garantir a estabilidade e a segurança das ferrovias. Eles consistem em um conjunto de elementos que atuam solidariamente e que conectam os trilhos aos dormentes, permitindo a transmissão de cargas e a absorção de vibrações. Um sistema de fixação bem projetado é essencial para a operação eficiente dos trens, minimizando o desgaste e a necessidade de manutenção. A seguir, são descritos os principais elementos da superestrutura da via permanente ferroviária.

- **Dormentes**, que são estruturas de suporte que recebem as cargas dos trilhos e as transmitem para o lastro ferroviário. Eles podem ser fabricados de diferentes materiais, como concreto, madeira ou aço, e a escolha do material depende de fatores como durabilidade, custo e as condições específicas da linha férrea. Dormentes de concreto são amplamente utilizados devido à sua resistência e longa vida útil.

- **Trilhos**, que são os elementos que guiam as rodas ferroviárias e por onde os trens circulam, sendo fixados aos dormentes por meio de diversos mecanismos de fixação. A geometria e o alinhamento dos trilhos são cruciais para a segurança da operação ferroviária. Qualquer desvio na posição dos trilhos pode levar a riscos operacionais significativos.

- **Fixações**, que são elementos responsáveis por fixar os trilhos aos dormentes. Isso inclui grampos, *tirefonds* e palmilhas (*rail-pads*). As palmilhas desempenham um papel importante, pois ajudam a reduzir vibrações e ruídos, melhorando o conforto dos passageiros e a durabilidade dos componentes ferroviários.

Esses componentes trabalham em sinergia para garantir que os trens possam operar com segurança e eficiência. Sistemas de fixação modernos, como o sistema *Fastclip*, oferecem vantagens adicionais, como facilidade de instalação e manutenção, além de melhor desempenho em condições de uso intenso. O uso de tecnologias inovadoras nesses sistemas tem contribuído para a redução de custos operacionais e para o aumento da segurança nas ferrovias.

ESTUDOS DO ENVELHECIMENTO E CARACTERIZAÇÃO EM POLÍMEROS USADOS EM SISTEMAS DE FIXAÇÃO DE FERROVIA

A caracterização da rigidez estática e dinâmica das palmilhas fabricadas a partir de diferentes materiais é essencial para a eficiência e a durabilidade dos sistemas de fixação ferroviários. Embora existam diversos estudos abordando essa temática (Zhang *et al.,* 2020; Khajehdezfuly, 2019; Tang *et al.*, 2024; Mazilu; Leu, 2017; Wei *et al.,* 2017; Ngamkhanong *et al.,* 2018), a investigação sobre a deterioração das propriedades dos polímeros em função das intempéries e de falhas mecânicas ainda é limitada (Ito; Nagai, 2008; Woo; Park, 2014).

Bondan (2014) explorou a produção de termoplásticos vulcanizados (TPVs) a partir da poliamida 6-12 (PA6-12) e do copolímero randômico de etileno e acetato de vinila (EVA), utilizando peróxido de dicumila (DCP) como agente reticulante. As misturas foram processadas em reômetro de torque, e a adição de DCP resultou em um aumento significativo da taxa de aumento de torque, indicando a formação de ligações cruzadas. Observou-se que a morfologia do sistema variava com a quantidade de EVA, com a presença de fases interconectadas e fragmentação parcial da fase EVA. Análises de DMTA (análise térmica dinâmico-mecânica, ou simplesmente DMA) indicaram a imiscibilidade do sistema, evidenciada por duas transições vítreas, enquanto a reticulação dinâmica aumentou a dureza do material, mas não melhorou suas propriedades mecânicas.

Sung e Hong (2020) estudaram a vida útil de palmilhas de poliuretano, analisando a rigidez estática por meio de testes de aceleração térmica, fadiga e carga térmica repetida. Amostras coletadas de ferrovias foram avaliadas, revelando um comportamento não linear para palmilhas novas e linear para palmilhas usadas. A pesquisa

destacou a relação entre o tempo de uso e a degradação das propriedades, possibilitando previsões sobre o período de substituição.

Rosu (2021) monitorou o envelhecimento térmico de elastômeros de poliéster uretano, observando que as propriedades físico-químicas e ópticas dos materiais se mantiveram estáveis até 200 horas de exposição a temperaturas elevadas. Alterações significativas ocorreram em grupos funcionais em temperaturas mais altas, resultando em mudanças nas propriedades termomecânicas.

Cerruti *et al.* (2005) investigaram o envelhecimento acelerado de filmes de poliamida 6.6 estabilizados com aditivos, utilizando uma câmara de envelhecimento com lâmpadas de xenônio. Essa fonte de radiação é a que melhor simula o envelhecimento natural, pois reproduz o espectro total da luz solar, incluindo a radiação ultravioleta, a visível e a infravermelha. Os resultados mostraram que não houve variação significativa da ductilidade e da resistência à tração devido à fotoxidação, evidenciando a eficácia dos aditivos na preservação das propriedades.

Kazemi-Najafi e Englund (2013) e Kadhim (2017) realizaram estudos similares com polietileno de alta densidade (PEAD), observando perdas significativas nas propriedades mecânicas devido à fotoxidação.

Woo e Park (2014) analisou a vida útil de palmilhas em ferrovias para trens de alta velocidade, considerando fatores de degradação e condições ambientais. O estudo utilizou testes de envelhecimento acelerado por calor e derivou uma equação para prever a vida útil das palmilhas, indicando que a mudança na dureza e na espessura poderia ser utilizada para determinar o cronograma de manutenção e substituição.

Esses estudos sobre as propriedades oferecem uma base fundamental para a interpretação dos resultados obtidos nas amostras analisadas em laboratório.

METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO

Para a caracterização das palmilhas *railpad* resilientes da EFC e das palmilhas *railpad* rígidas da EFVM, foram coletadas cerca de 10 amostras em cada ferrovia, em dois estados de conservação: novo e danificado após o uso, antes do tempo total de serviço. A escolha das amostras usadas foi realizada com o auxílio da equipe da Vale S.A., de forma que representasse as condições reais das vias.

O Quadro 1 apresenta as amostras analisadas neste trabalho, bem como suas origens, descrições e códigos de identificação. Uma extensa sequência de diferentes testes foi realizada para caracterizar os materiais selecionados. Esses testes foram selecionados visando aferir todas as características consideradas relevantes e fornecer as informações necessárias para as demais etapas de projeto, como parâmetros mecânicos, físicos e químicos, a fim de subsidiar o desenvolvimento de novos materiais e, dessa forma, indicar alterações em suas composições, obtendo-se uma especificação técnica final de produto.

Quadro 1 – Nomenclatura das palmilhas recebidas para este trabalho, com descrição de origem

Origem	Descrição	Identificação	Foto
Vale S.A. – Ferrovia EFC (Fornecedor I)	Palmilha railpad resiliente nova (A)	IA	
Vale S.A. – Ferrovia EFC (Fornecedor I)	Palmilha railpad resiliente em uso, retirada para análise (B)	IB	
Vale S.A. – Ferrovia EFVM (Fornecedor II)	Palmilha railpad rígida nova (A)	IIA	
Vale S.A. – Ferrovia EFVM (Fornecedor II)	Palmilha railpad rígida em uso, retirada para análise (B)	IIB	

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

As amostras tiveram a morfologia das superfícies analisada por meio de ensaios de microscopia óptica (MO) e de microscopia eletrônica de varredura (MEV), buscando identificar os principais mecanismos de desgaste. Já para questões relacionadas à manutenção da composição química, as amostras foram analisadas por meio da espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) com acessório de reflectância total atenuada universal (UATR).

As propriedades térmicas foram avaliadas quanto à estabilidade térmica em analisador termogravimétrico (TGA), bem como pela determinação das transições térmicas e dos processos físicos e químicos que ocorrem nos polímeros durante o aquecimento, por meio de curvas calorimétricas obtidas empregando a calorimetria diferencial exploratória (DSC). Também foram realizadas análises dinâmico-mecânicas para a avaliação das características viscoelásticas dos materiais, indicando o efeito das vibrações e da temperatura nas propriedades mecânicas dos polímeros empregados nas fixações. Para a determinação das propriedades mecânicas, foram realizados ensaios de tensão/deformação e de dureza *Shore* A e D.

MICROSCOPIA ÓPTICA (MO)

A coleta de imagens ópticas foi realizada com um esteromicroscópio trinocular, modelo Stemi 508, marca Carl Zeiss, com iluminação episcópica via anel de LED, câmera Axiocam 105 color de 5 megapixels e *software* de controle e análise de resultados ZEN 3.0 (Blue Edition, 2019), marca Carl Zeiss Microscopy GmbH, para aquisição e tratamento de imagens e medições lineares.

MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A avaliação da morfologia das amostras foi conduzida com um microscópio eletrônico de varredura Jeol, modelo JSM6510LV, com modos de detecção por elétrons secundários (SEI) e *software* de controle e análise de resultados SEM Control User Interface Ver 3.01. Para análises elementares, foi utilizada uma sonda de análise elementar por energia dispersiva de raios X, modelo UltraDry, marca Thermo Scientific, com *software* NSS 3.0, Thermo Fisher Scientific, acoplada ao microscópio eletrônico. As micrografias foram obtidas a uma energia de aceleração de 10 kV, com distância de trabalho (WD) média

de 12 mm. Todas as amostras foram previamente recobertas com uma fina camada de ouro para o aumento da condutividade, visando à obtenção das imagens. Foram coletadas imagens da superfície da amostra bruta, nova e usada, bem como da seção transversal, a partir de fraturas criogênicas por imersão em nitrogênio líquido.

ESPECTROMETRIA POR INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

A espectrometria por infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica versátil e rápida, utilizada na identificação, caracterização e quantificação, normalmente, de compostos moleculares. As análises de infravermelho foram realizadas utilizando um espectrofotômetro de infravermelho Spectrum Two, marca Perkin Elmer, com acessório de reflectância universal atenuada (UATR) e *software* de controle e análise de dados Spectrum IR, versão 10.7.2.1630, Copyright 2020 Perkin Elmer Inc. Todos os espectros foram obtidos na faixa de 4000 a 400 ou 600 $cm^{-1,}$ com resolução de 4 cm^{-1} e 32 varreduras.

ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

A análise termogravimétrica baseia-se no estudo da variação de massa de uma amostra, resultante de uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação) ou química (degradação, decomposição, oxidação), em função do tempo ou da temperatura.

A análise termogravimétrica foi realizada em um analisador termogravimétrico TGA 51H, marca Shimadzu, com *software* de controle e análise de resultados LabSolutions TA: Postrun, versão 1.01, Copyright (C) Shimadzu Corporation. As amostras foram aquecidas de 25 a 1000 °C, com taxa de aquecimento de 20 °C/min, em cadinho de platina, sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50 mL/min.

CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)

Na realização das análises de calorimetria exploratória diferencial, foi utilizado um calorímetro exploratório diferencial DSC 6000, marca Perkin Elmer, com *software* de controle e análise de resultados Pyris, versão 13.3.1.0014, Copyright (C) 2016 Perkin Elmer, Inc. Os ensaios foram realizados utilizando-se porta-amostras padrão de alumínio, nas seguintes condições: temperatura inicial de 25 °C, temperatura final de 350 °C ou 430 °C, taxa de aquecimento de 10 °C/min, sob fluxo de nitrogênio de 20 mL/min e massa média de 0,10 mg.

ANÁLISE DINÂMICO-MECÂNICA (DMA)

O ensaio foi realizado com base na norma ASTM D5418, utilizando um analisador dinâmico-mecânico DMA1, marca Mettler Toledo, com *software* de controle e análise de resultados STARe Software, versão 15.00 (Build 8668), Copyright (C) Mettler-Toledo GmbH 1993-2016. Para a determinação da $T_{g,}$ o método aplicado considerou o modo *clamp single cantilever*, amplitude de 10 µm, taxa de aquecimento de 3 °C/min^{-1}, pré-carga de 0,01 N, frequência de 1Hz e temperatura de trabalho de -100 a 120 °C.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E DEFORMAÇÃO

A determinação da resistência à tração foi realizada conforme a norma ISO 527, utilizando corpos de prova tipo 1A, em uma máquina universal de ensaios EMIC, com velocidade de afastamento entre garras de 50 mm/min e célula de carga de 200 kN. É importante ressaltar que os valores de resistência encontrados na tração e no alongamento referem-se a corpos de prova (10 mm de largura por 4 mm de espessura) usinados a partir de peças já injetadas, podendo haver variações significativas nas medidas.

DUREZA

Os ensaios de dureza foram realizados segundo a norma ASTM D 2240, com tempo de leitura em 1s. Foi utilizado nos ensaios um durômetro *Shore* A e D, marca Pantec. O resultado foi obtido pela média de nove medições de dureza para cada amostra. A medida foi obtida com o auxílio de suporte para durômetro A e D.

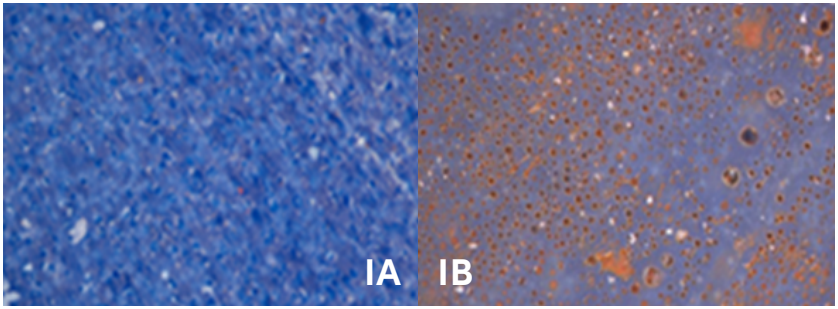
RESULTADOS E DISCUSSÃO SOBRE DESEMPENHO EM CONDIÇÕES REAIS

MICROSCOPIA ÓPTICA (MO)

Por meio da microscopia óptica, constatou-se que as palmilhas apresentavam uma textura lisa, com detalhes do processo de injeção. Também foi possível verificar a presença de partículas na matriz polimérica, que aumentam em número e diversidade de cor e tamanho quando se transita da amostra IA para a IB. A Figura 1 apresenta fotomicrografias com ampliação de 40x das palmilhas IA e IB.

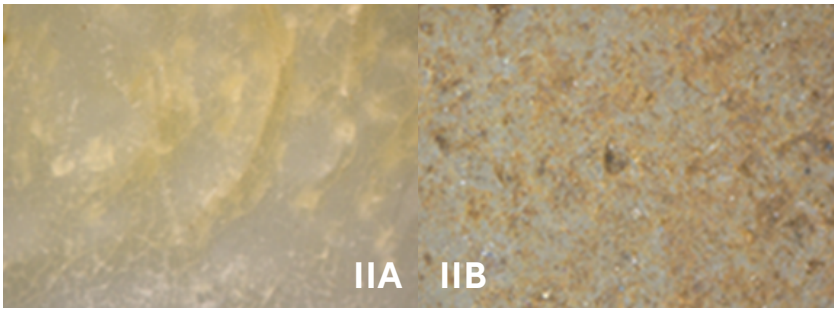
Já nas palmilhas IIA e IIB, de poliamida, observou-se superfície lisa, característica do polímero novo (IIA) e, ao transitar para o estado usado (IIB), a presença de diversos pontos escuros e avermelhados, característicos da ferrovia. A Figura 2 apresenta fotomicrografias com ampliação de 40x das palmilhas IIA e IIB.

Figura 1 – Fotomicrografias das palmilhas IA e IB com ampliação de 40x



Fonte: acervo dos autores (2025).

Figura 2 – Fotomicrografias das palmilhas IIA e IIB com ampliação de 40x

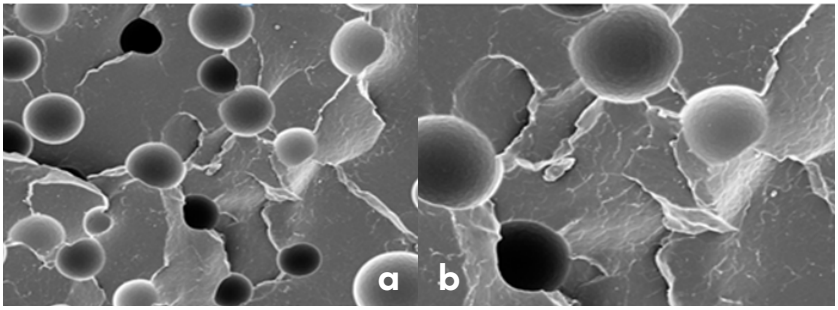


Fonte: acervo dos autores (2025).

MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

As micrografias das Figuras 3 e 4 apresentam as morfologias das superfícies de fratura criogênica (seção transversal) das palmilhas novas, utilizadas atualmente na ferrovia.

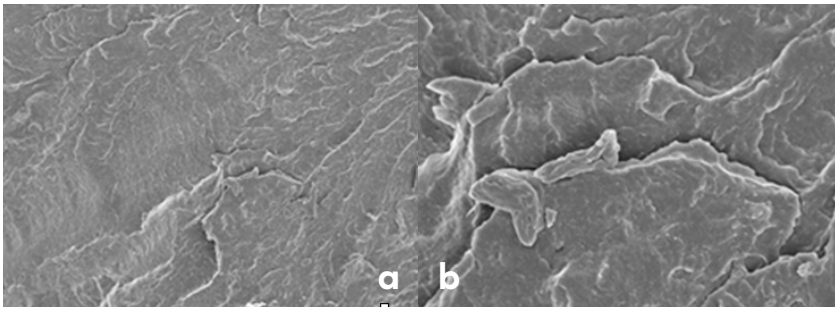
Figura 3 – Micrografias da palmilha IA com ampliações de (a) 250x e (b) 500x



Fonte: acervo dos autores (2025).

A partir das micrografias, foi possível observar que a amostra IA apresentou superfície porosa, com mecanismo de microtrincamento padrão do poliuretano celular.

Figura 4 – Micrografias da amostra IIA com ampliações de (a) 250x e (b) 1000x



Fonte: acervo dos autores (2025).

Por sua vez, a amostra IIA apresenta superfície de fratura criogênica rugosa e contínua, bem como não porosa.

As morfologias verificadas para as duas peças apresentadas nas Figuras 3 e 4 são compatíveis com o que se poderia esperar para o tipo de material que as compõe, segundo os fabricantes. No entanto, por meio de microscopias, não é possível determinar os materiais de que são constituídas cada palmilha. Apesar disso, é possível verificar que a primeira amostra (IA) apresenta superfície de fratura criogênica porosa, característica de espumas com densidade aparentemente significativa,

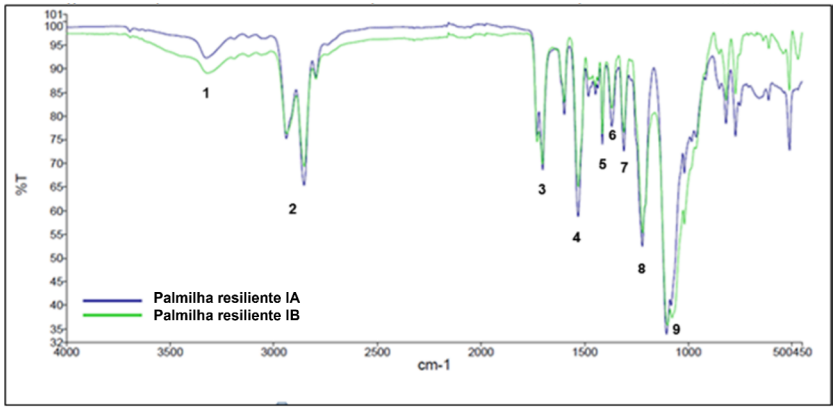
compatível com a capacidade de absorver a energia fornecida pela passagem dos trens sobre a via. No entanto, a porosidade sugere a possibilidade de guardar memória dimensional, isto é, a possibilidade de manter uma estrutura dimensional deformada após ser submetida à compressão, por exemplo, pela passagem dos trens. Já a segunda amostra (IIA), com uma matriz muito mais densa, sugere menor possibilidade de sofrer deformação permanente por retenção de memória dimensional em função da compressão, mas indica ser mais quebradiça do que a primeira (Chaichanawong; Thongchuea; Areerat, 2016).

ESPECTROMETRIA POR INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Segundo informações do fabricante, as amostras IA e IB tratam-se de peças produzidas em poliuretano, e as amostras IIA e IIB, em poliamida.

O Gráfico 1 apresenta os espectros de infravermelho das amostras IA e IB. As bandas de absorção coletadas a partir dos espectros de infravermelho das amostras IA e IB, de poliuretano, são apresentadas na Tabela 1.

Gráfico 1 – Sobreposição comparativa dos espectros no infravermelho das palmilhas resilientes IA e IB



Fonte: acervo dos autores (2025).

Tabela 1 – Principais deslocamentos das bandas de absorção na região do infravermelho encontrados para as amostras IA e IB

Número da banda	Número de Onda (cm-1)	Grupamento Característico
1	3322	Deformação axial de >N-H
2	2938 – 2853	Deformação axial de C-H alifático
3	1634	Deformação axial de C=O
4	1597	Deformação axial de >N-C=O
5	1530	Deformação angular simétrica no plano de >N-H
6	1480	Deformação angular de C-H alifático (grupo metileno)
7	1366	Deformação de C-H alifático (grupo metila)
8	1219	Deformação axial assimétrica de -C-C(=O)-O
9	1104	Deformação axial assimétrica de -C-O-C- de éter

Fonte: adaptado de Mark (2009).

A análise desses resultados sugere que o material de constituição das amostras se trata, de fato, de um poliuretano poliéter, corroborando os dados oferecidos pelo fornecedor das peças.

A comparação dos dados obtidos para as amostras IA e IB também sugere que a amostra retirada da ferrovia (IB), em uso, pode ter sofrido degradação hidrolítica. Essa sugestão decorre da verificação do aumento da intensidade e do alargamento da banda em torno de 3322 cm^{-1}, que corresponde à deformação axial das ligações N-H.

Apesar da possibilidade de hidrólise, dadas as condições de uso da peça, de maneira geral, a comparação entre as duas amos-

tras revela que as bandas principais relacionadas ao grupo uretano (como >N-H, C=O e >N-C=O) permanecem quase inalteradas, sugerindo que a estrutura química principal do material se mantém estável, mesmo após o uso em condições adversas. Isso indica uma boa durabilidade do material em termos químicos, apesar de algum desgaste mecânico.

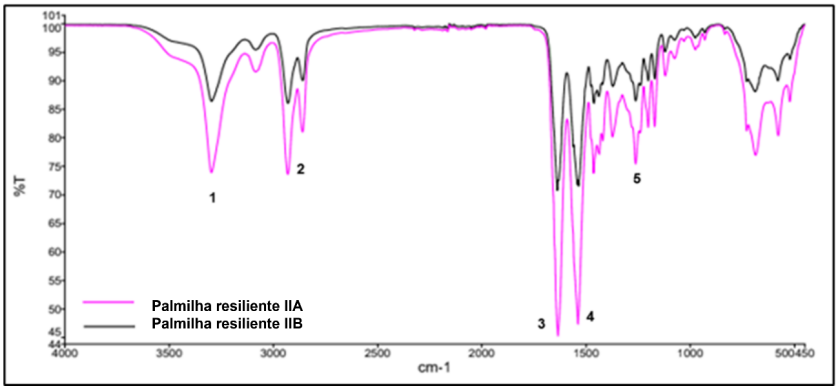
A exposição contínua a condições ambientais adversas, como umidade, temperatura e estresse mecânico na ferrovia, pode acelerar processos como hidrólise e oxidação. A hidrólise pode afetar diretamente as ligações uretânicas (N-H e C=O), enquanto a oxidação pode estar relacionada à cisão de ligações C-O-C e C-C.

A análise de infravermelho, apesar de diferenças discretas, sugere sinais de degradação no poliuretano da palmilha usada, que foram corroborados por outros dados analíticos. Essa degradação, principalmente a possível hidrólise, pode comprometer a durabilidade e a resiliência da peça.

A Figura 6 apresenta o espectro de infravermelho das amostras do fornecedor IIA e IIB, e as principais bandas perceptíveis no espectro estão listadas na Tabela 2.

É possível observar, no Gráfico 2, grande semelhança entre os espectros das peças de poliamida, sugerindo que os principais grupos funcionais – as bandas relacionadas ao estiramento, ou deformação axial, de N-H (3300 cm^{-1}), aos estiramentos assimétricos e simétricos de CH_2 (2920 e 2860 cm^{-1}) e às carbonilas (1634 cm^{-1}) – mantiveram-se estáveis durante o período de uso. Isso indica que a poliamida manteve a integridade química de sua estrutura principal, mesmo após o uso prolongado, sugerindo boa resistência química do material.

Gráfico 2 – Sobreposição comparativa dos espectros no Infravermelho das palmilhas resilientes do fornecedor IIA e IIB



Fonte: acervo dos autores (2025).

Tabela 2 – Principais bandas de absorção de poliamida

Número da banda	Número de onda (cm-1)	Estrutura química
1	3300	Deformação axial de >N-H
2	2920 – 2860	Deformação axial de C-H alifático
3	1640	Deformação axial de C=O grupamento amida
4	1540	Deformação angular simétrica no plano de >N-H
5	1200	Deformação angular N-C=O

Fonte: adaptado de Mark (2009).

Para as palmilhas de PA6, foram observadas as bandas de alta intensidade de absorção em 3300cm^{-1}, 2920cm^{-1}, 2860cm^{-1}, 1640cm^{-1} e 1540cm^{-1} referentes às estruturas químicas de NH, CH_2 (estiramento assimétrico e simétrico), amida C=O e estiramento do CH_2 adjacente

ao N, respectivamente. Também foram observadas bandas de menor intensidade de absorção em 1640cm^{-1} e 1200cm^{-1}, referentes às estruturas químicas de produtos à base de carbonila e N-C=O, respectivamente (Mark, 2009).

Nos ensaios de FTIR, a poliamida apresentou boa resistência química, conforme evidenciado pela comparação dos espectros de infravermelho, com pouca degradação química significativa detectada.

ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

O objetivo deste ensaio de TGA foi analisar o comportamento térmico das palmilhas em relação à temperatura de decomposição. Assim, foi possível verificar a degradação térmica e identificar a quantidade residual de suas composições, conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Temperaturas de decomposição por TGA das amostras

Amostra	Temperatura de início decomposição, T_i (°C)	Temperatura de final decomposição, T_f (°C)	Massa residual, m.r. (%)
IA	287,6	625,4	8,5
IB	255,5	611,7	8,7
IIA	373,4	526,3	6,2
IIB	349,5	560,5	7,7

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

As palmilhas resilientes IA e IB apresentam perdas de massa no intervalo de 287,6 °C a 625,4 °C. Quanto à massa residual das amostras,

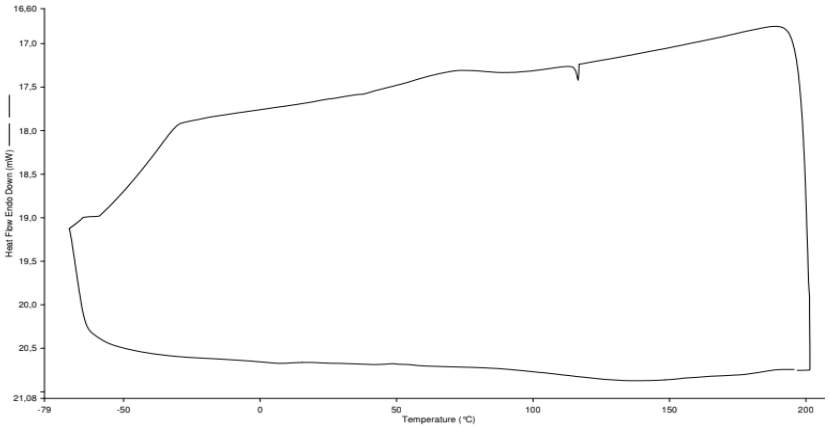
observou-se uma variação entre 8,5% e 8,7%, o que indica a presença de cargas de reforço e/ou aditivos incorporados às formulações.

Por sua vez, as amostras de poliamida IIA e IIB exibiram perdas de massa nas faixas de 373,0 °C a 526,3 °C e de 349,5 °C a 560,5 °C, respectivamente. As quantidades de resíduo final foram semelhantes às observadas para as amostras IA e IB, o que pode ser interpretado como indicativo da formação de resíduos carbônicos provenientes da degradação térmica em atmosfera inerte, considerando que as massas de amostra utilizadas nas análises são semelhantes.

CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)

O Gráfico 3 apresenta a curva de DSC da palmilha IA, na qual se observa uma transição térmica, possivelmente associada à transição vítrea (Tg), seguida de um processo endotérmico que pode estar relacionado à fusão parcial ou ao reordenamento das cadeias poliméricas. O comportamento de degradação ou fusão não consegue ser detectado em função da característica amorfa da amostra (Carvalho, 2014).

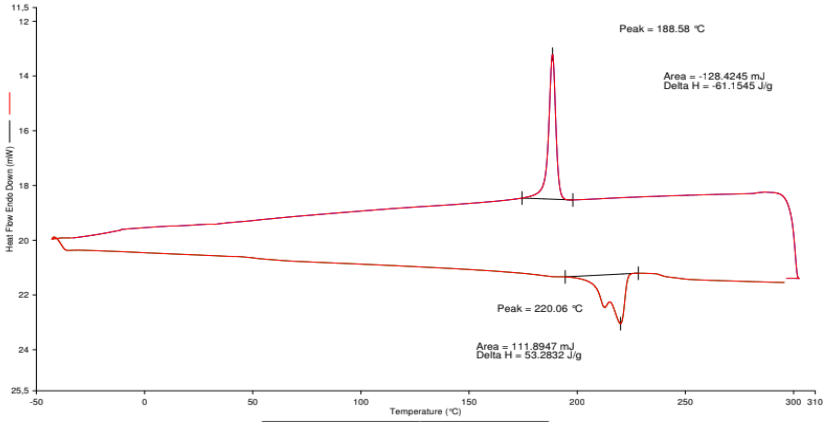
Gráfico 3 – Curvas de DSC da palmilha IA



Fonte: acervo dos autores (2025).

O Gráfico 4 ilustra a curva de DSC da amostra da palmilha *railpad* rígida IIA. É possível observar um evento endotérmico a 220 ºC, correspondente à fusão do material, e outro exotérmico a 188 ºC, indicando a cristalização, características típicas das poliamidas. O sinal endotérmico mais proeminente, em 220 °C, é acompanhado de outro em temperatura um pouco mais baixa, provavelmente relacionado a um componente de ponto de fusão correspondente, mas que não foi possível de ser caracterizado mediante às técnicas aplicadas neste trabalho.

Gráfico 4 – Curvas de DSC da palmilha IIA



Fonte: acervo dos autores (2025).

Corroborando os ensaios de FTIR, as amostras identificadas apresentaram comportamento amorfo no ensaio de DSC, como mostra a Figura 9, ou seja, os materiais exibem transições térmicas associadas a mudanças em sua estrutura molecular, mas sem um padrão de cristalinidade claro.

O poliuretano é um polímero formado por segmentos alternados de poliéter ou poliéster e diisocianato. Dependendo da proporção

e da natureza desses blocos, o material pode exibir uma variedade de propriedades, incluindo a tendência a ser amorfo em menor ou maior grau (Oliveira; Faulstich de Paiva; Botaro, 2014).

A presença de grupos flexíveis nas cadeias poliméricas do poliuretano pode contribuir para sua natureza amorfa. Nesse sentido, grupos flexíveis geralmente permitem maior mobilidade molecular e, portanto, podem não exibir estruturas cristalinas distintas.

As condições durante o processo de fabricação das palmilhas *railpad* ferroviárias, como a temperatura de cura, o tempo de polimerização e a velocidade de resfriamento da peça, podem influenciar significativamente as características térmicas do material de composição. Além disso, a estrutura química específica do poliuretano, incluindo a escolha de diisocianato e poliol, pode resultar em diferentes graus de ordem molecular (Woo; Park, 2014).

ANÁLISE DINÂMICO-MECÂNICO (DMA)

Com o ensaio de DMA foi possível avaliar, dentre outras características, a temperatura de transição vítrea (Tg) por meio da avaliação da tan δ, que define a mudança de um comportamento rígido e frágil (abaixo da Tg), eventualmente, para um comportamento borrachoso (acima da Tg). A Tabela 4 apresenta valores de módulo de armazenamento (E′), módulo de perda (E″) e de tan δ medidos para as palmilhas analisadas.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de DMA nas palmilhas novas e usadas

Amostras	Módulo de armazenamento, E' (MPa)		Módulo de perda, E'' (MPa)		Temperatura de transição vítrea, T_g (°C)
	30°C	70°C	30°C	70°C	
IA	4,34	3,86	0,26	0,15	-52
IIA	5,02	4,47	0,17	0,11	-49
IB	332,30	205,60	21,50	11,90	10,6
IIB	61,90	36,60	5,00	2,60	4,7
Obs.: as temperaturas de 30 e 70 °C são as que se arbitrou para a coleta dos dados, em decorrência das temperaturas de trabalho na ferrovia.					

Fonte: elaborada pelos autores (2025).

Relacionando os dados da curva tan δ com as temperaturas de transição vítrea (Tg), para selecionar a melhor palmilha para uso na ferrovia com base nos dados fornecidos de rigidez (E') e amortecimento (E''), consideraram-se os fatores apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Relação do amortecimento, rigidez e temperatura de transição vítrea das palmilhas novas e usadas

Amostra	Rigidez (E' - armazenamento)	Amortecimento (E'' - perda)	Transição Vítrea (Tg)
IA	Moderadamente alta (4,34 MPa a 30 °C), o que indica que a palmilha não é excessivamente rígida, mas ainda oferece algum suporte.	Muito baixo (0,26 MPa a 30 °C e 0,15 MPa a 70 °C), indicando baixo desempenho de dissipação de energia.	**Tg**: -52 °C, extremamente baixa, sugerindo que a palmilha permanece flexível em baixas temperaturas, o que pode ser útil para ambientes frios.
IIA	Similar ao sem uso (5,02 MPa a 30 °C), indicando que a palmilha não perde muito em rigidez, o que é positivo para a durabilidade.	Ainda menor após o uso (0,17 MPa a 30 °C), mostrando redução de eficiência.	**Tg:** -49 °C, mantendo-se flexível em baixas temperaturas mesmo após o uso.
IB	Extremamente alta (332,30 MPa a 30 °C), o que pode ser demasiadamente rígido, mas ideal para aplicações de alto impacto e uso prolongado.	Muito elevado (21,50 MPa a 30 °C e 11,90 MPa a 70 °C), o que indica excelente dissipação de energia e alta capacidade de amortecimento.	**Tg:** 10,6 °C, o que sugere que, à medida que a temperatura cai, a palmilha se mantém razoavelmente rígida, mas perde flexibilidade em temperaturas abaixo dessa.
IIB	Muito mais baixa que a palmilha nova (61,90 MPa a 30 °C), mostrando que a palmilha perde rigidez após o uso, ficando mais flexível.	Reduzido (5,00 MPa a 30 °C e 2,60 MPa a 70 °C) em comparação com a versão usada indicando perda de eficiência após o uso.	**Tg:** 4,7 °C, também menor que a nova, indicando que após o uso a palmilha tende a endurecer mais rapidamente em temperaturas abaixo dessa faixa.

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

A rigidez dos polímeros corresponde à sua capacidade de resistir à deformação elástica quando submetidos a esforços mecânicos. Essa propriedade está intimamente relacionada ao módulo de elasticidade (módulo de Young), sendo predominantemente observada na região linear da curva tensão-deformação, onde o comportamento do material ainda é essencialmente elástico.

A resiliência, por sua vez, refere-se à habilidade do polímero de absorver energia durante a deformação elástica e de recuperar sua forma original após a remoção da carga, sem apresentar deformações permanentes. Trata-se de uma propriedade crucial em aplicações que envolvem cargas dinâmicas ou repetidas, sendo quantificada pela **área sob a curva tensão-deformação na região elástica**.

Já o amortecimento (ou capacidade de dissipação de energia) diz respeito à aptidão do material polimérico em absorver e dispersar energia mecânica oriunda de vibrações, impactos ou ondas sonoras, convertendo parte dessa energia em calor devido ao seu comportamento viscoelástico. Esse fenômeno é fundamental para o desempenho de componentes sujeitos a solicitações dinâmicas, especialmente em sistemas de controle de vibração e ruído.

Com isso, entre as opções citadas acima, a IIA (PA) destaca-se pela elevada eficiência antes do uso, combinando rigidez superior com excelente capacidade de dissipação de energia. Após o uso, a IIB (PA) apresenta uma leve redução na rigidez, mas mantém bom desempenho em amortecimento, sendo indicada para fases intermediárias de utilização.

Em condições de baixas temperaturas, as palmilhas IA e IB (PU) são preferidas devido à sua flexibilidade, embora apresentem menor eficiência em amortecimento. Quando o objetivo é resistência ao impacto e durabilidade, a IIA (PA) permanece como a escolha ideal antes do uso.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E ALONGAMENTO NA RUPTURA

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados do ensaio de resistência à tração e alongamento na ruptura das palmilhas IA e IB, IIA e IIB.

Tabela 5 – Resistência à tração e alongamento na ruptura das amostras analisadas

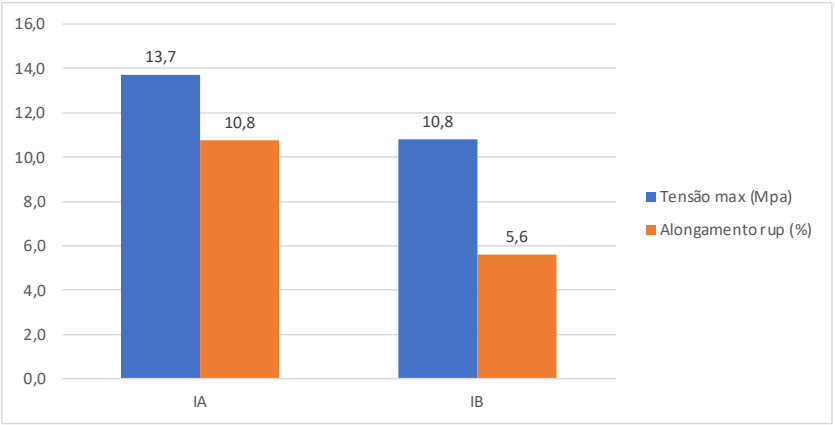
Amostras	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)
IA	13,7 ± 0,8	10,8 ± 1,5
IB	10,8 ± 0,5	5,6 ± 0,7
IIA	42,8 ± 4,7	67,2 ± 6,3
IIB	27,8 ± 6,9	18,7 ± 5,6

Fonte: elaborada pelos autores (2025).

Em condições reais de uso, as palmilhas *railpad* podem estar sujeitas a uma variedade de fatores, incluindo abrasão, exposição a produtos químicos e variações de temperatura, dentre outros. Esses fatores podem levar a uma degradação seletiva, enfraquecendo certas regiões do poliuretano e resultando na redução das propriedades de tração e alongamento. A fotoxidação em ambientes como o da ferrovia é ainda mais potencializada devido à exposição a temperaturas entre 20 ºC e 70 °C (Ito; Nagai, 2008), à presença de poluentes da atmosfera, como o dióxido de enxofre, ao esforço mecânico e à presença de umidade (Rabek, 2012; Ashter, 2016).

A palmilha IA apresentou 21% e 48% de perda nas propriedades de resistência à tração e alongamento na ruptura, respectivamente, em relação à amostra IB, que corresponde à versão usada do material. O Gráfico 5 mostra a comparação das propriedades de resistência à tração e alongamento na ruptura das amostras IA e IB.

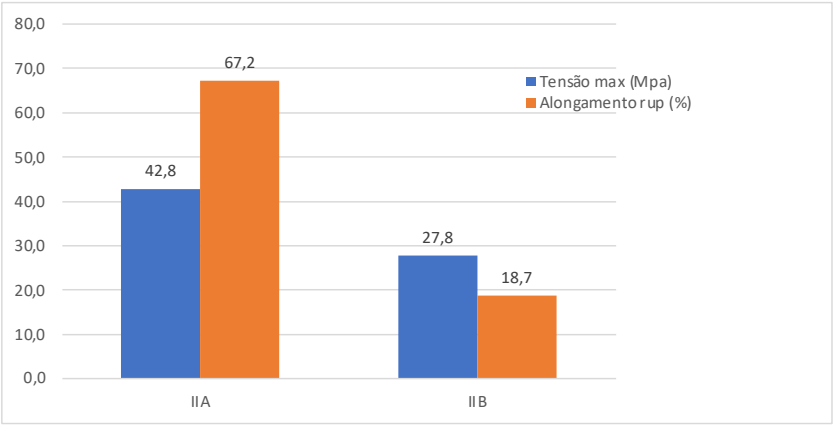
Gráfico 5 – Comparação da resistência à tração e alongamento das amostras Fornecedor IA e IB



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Já a amostra IIA (nova) apresentou uma redução de 35% na resistência à tração e de 72% no alongamento na ruptura, quando comparada à amostra IIB, que corresponde à versão usada do material. Sugere-se que a diminuição das propriedades mecânicas seja resultado da diminuição da massa molar da poliamida devido à fotoxidação (Puttonen, 2021). O Gráfico 6 mostra a comparação das propriedades de resistência à tração e alongamento na ruptura das amostras IIA e IIB.

Gráfico 6 – Comparação da resistência à tração e alongamento das amostras do fornecedor IIA e IIB

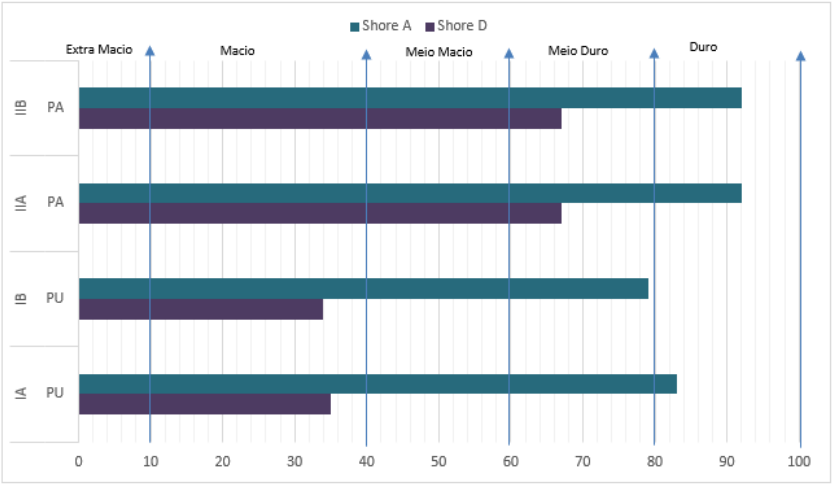


Fonte: elaborado pelos autores (2025).

ENSAIO DE DUREZA

Dentro de cada grupo de polímeros, existe variação nos valores de dureza, indicando a influência de fatores como formulação, processamento ou outras variáveis. No Gráfico 7, estão apresentadas as durezas *Shore* A e *Shore* D, medidas segundo a norma ASTM D-2000, para as amostras IA, IB, IIA e IIB.

Gráfico 7 – Comparação de durezas
das amostras IA, IB, IIA e IIB segundo a norma ASTM D-2000



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Os resultados dos ensaios de dureza *Shore* A e *Shore* D evidenciam variações expressivas nas propriedades mecânicas das amostras analisadas em ambas as escalas. Ao se comparar a palmilha de poliuretano atualmente utilizada (amostra IA) com a previamente usada (amostra IB), verifica-se uma redução de aproximadamente 7% na dureza, atribuída ao desgaste por uso prolongado, embora não seja possível determinar com exatidão o limite crítico de perda de dureza nem o tempo necessário para sua ocorrência.

Em contraste, a palmilha de poliamida (amostra IIA) manteve sua dureza inalterada mesmo após o mesmo período de uso da amostra IIB, conforme ilustrado na Figura 12. Ressalta-se que, embora o poliuretano apresente suscetibilidade à variação de dureza, formulações com maior rigidez tendem a demonstrar superior resistência à abrasão, característica que consolida o material como opção recorrente em aplicações que exigem desempenho mecânico consistente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos ao longo desta pesquisa destacam a importância de uma criteriosa seleção de materiais poliméricos para as fixações ferroviárias. A durabilidade dos componentes está diretamente relacionada à capacidade de os materiais manterem suas propriedades mecânicas e viscoelásticas em condições de uso intenso e de exposição ao ambiente.

A caracterização físico-química, térmica e mecânica das palmilhas analisadas evidenciou a influência significativa do tempo de uso e das condições operacionais sobre suas propriedades. As análises revelaram que o desgaste funcional está diretamente relacionado à perda de dureza, rigidez e resistência mecânica, sendo esses parâmetros cruciais para a confiabilidade e a durabilidade dos sistemas de fixação ferroviária.

Os ensaios térmicos e espectroscópicos indicaram boa estabilidade estrutural dos materiais frente à degradação química, com manutenção parcial das características essenciais mesmo após exposição ambiental prolongada. Já as análises dinâmico-mecânicas e de tração evidenciaram alterações relevantes na capacidade de amortecimento e de suporte após o uso, impactando diretamente a eficiência da peça durante a operação ferroviária.

Diante disso, recomenda-se que a escolha dos componentes poliméricos seja orientada por uma avaliação criteriosa dos dados de caracterização, alinhada às exigências mecânicas e ambientais de cada trecho ferroviário. A adoção de estratégias técnicas que envolvam controle de formulação, monitoramento de desempenho e gestão de manutenção pode ampliar a vida útil das palmilhas e contribuir para sistemas ferroviários mais seguros e eficientes.

REFERÊNCIAS

AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION (AREMA). **Chapter 30**. *In*: AREMA. Evaluative Tests for Tie Systems. Lanham: AREMA, 2016.

ASHTER, S. A. Mechanisms of Polymer Degradation. **Introduction to Bioplastics Engineering**, p. 31-59, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/b978-0-323-39396-6.00003-8. Acesso em: 11 fev. 2026.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D 2240**: Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness. West Conshohocken: PA, 2015.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D 3418**: Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry. West Conshohocken: PA, 2015.

ASTM INTERNATIONAL**. ASTM D 5418**: Standard Guide for the Assessment of the Resistance of Plastic Materials to Environmental Stress Cracking. West Conshohocken: PA, 2015.

BONDAN, F. **Preparação e caracterização de elastômeros reticulados dinamicamente de PA 6-12/EVA**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade de Caxias do Sul, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Caxias do Sul, 2014.

CARVALHO, J. E. de. **Caracterização do poliuretano derivado de óleo vegetal para confecção de dispositivo de assistência ventricular**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CERRUTI, P.; LAVORGNA, M.; CARFAGNA, C.; NICOLAIS, L. Comparison of photo-oxidative degradation of polyamide 6,6 films stabilized with HALS and CuCl2+KI mixtures. **Polymer**, [*s. l.*], v. 46, n. 21, p. 8891-8900, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.03.065. Acesso em: 11 fev. 2026.

CHAICHANAWONG, J.; THONGCHUEA, C.; AREERAT, S. Effect of moisture on the mechanical properties of glass fiber reinforced polyamide composites. **Advanced Powder Technology**, [*s. l.*], v. 27, n. 3, p. 898-902, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2016.02.006. Acesso em: 11 fev. 2026.

GONÇALVES, E. S.; POULSEN, L.; OGILBY, P. R. Mechanism of the temperature-dependent degradation of polyamide 66 films exposed to water. **Polymer Degradation and Stability**, [*s. l.*], v. 92, n. 11, p. 2092-2101, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.08.007. Acesso em: 11 fev. 2026.

ITO, M; NAGAI, K. Degradation issues of polymer materials used in railway field. **Polymer Degradation and Stability**, [*s. l.*], v. 93, n. 10, p. 1723-1735, 2008.

JIANG, X.; KOLSTEIN, H.; BIJLAARD, F. S. K. Moisture diffusion and hygrothermalaging in pultruded fibre reinforced polymer composites of bridge decks. **Materials&Design**, [*s. l.*], v. 37, p. 304-312, 2012.

KADHIM, L. F. Mechanical Properties of High Density Polyethylene/Chromium Trioxide under Ultraviolet Rays**. International Journal of Applied Engineering Research**, [*s. l.*], v. 12, n. 10, p. 2517-2526, 2017.

KAEWUNRUEN, S.; NGAMKHANONG, C.; NG, J. Influence of time-dependent material degradation on life cycle serviceability of interspersed railway tracks due to moving train loads. **Engineering Structures**, [*s. l.*], v. 199, p. 109625, 2019.

KAZEMI-NAJAFI, S.; ENGLUND, K. R. Effect of highly degraded high-density polyethylene (HDPE) on processing and mechanical properties of wood flour- HDPE composites. **Journal of Applied Polymer Science**, [*s. l.*], v. 129, n. 6, p. 3404- 3410, 2013.

KHAJEHDEZFULY, A. Effect of rail pad stiffness on the wheel/rail force intensity in a railway slab track with short-wave irregularity. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 233, n. 10, p. 1038-1049, 2019

MARK, J. E. **Polymer data handbook**. USA: Oxford University Press, 2009.

MAZILU, T.; LEU, M. Impact of the rail-pad multi-discrete model upon the prediction of the rail response. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 227, p. 012079, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1088/1757-899x/227/1/012079. Acesso em: 11 fev. 2026.

OLIVEIRA, R. M.; FAULSTICH DE PAIVA, J. M.; BOTARO, V. R. Influence of processing parameters on the properties of polymeric blends. **Revista Ibero-Americana de Polímeros**, [*s. l.*], v. 15, n. 5, p. 261-274, 2014.

PUTTONEN, T.; SALMI, M.; PARTANEN, J. Mechanical properties and fracture characterization of additive manufacturing polyamide 12 after accelerated weathering. Aalto University School of Engineering, Department of Mechanical Engineering. **Polymer Testing**, [*s. l.*], v. 104, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107376. Acesso em: 11 fev. 2026.

RABEK, J. F. **Polymer Photodegradation**: Mechanisms and Experimental Methods. 2. ed. Berlin: Springer, 2012.

ROSU, L.; VARGANICI, C. D.; ROSU, D.; OPREA, S. Effect of Thermal Aging on the Physico-Chemical and Optical Properties of Poly(ester urethane) Elastomers Designed for Passive Damping (Pads) of the Railway. **Polymers**, [*s. l.*], v. 13, n. 2, p. 192, 2021.

SUNG, D.; HONG, S. A simple method to assess replacement period of polyurethane railpad in urban railway. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 248, p. 118607, 2020.

TANG, S.; LI, Z.; SUN, W.; LIU, Y.; WANG, J.; WANG, X.; LIN, J. Natural Rubber/Styrene–Butadiene Rubber Blend Composites Potentially Applied in Damping Bearings, **Polymers**, [*s. l.*], v. 16, n. 13, p. 1945, 2024. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/polym16131945. Acesso em: 19 fev. 2026.

WEI, L.; CHEN, Z.; SHI, L.; LONG, R.; ANZALONE, A. V.; ZHANG, L.; HU, F.; YUSTE, R.; CORNISH, V. W.; MIN, W. Super-multiplex vibrational imaging. **Nature**, [*s. l.*], v. 544, p. 465-470, 2017.

WOO, C. S.; PARK, H. S. Useful Lifetime Prediction of Rail Pads for High-Speed Trains. **International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering**, Daejeon, v. 8, n. 4, p. 723-726, 2014.

ZHANG, X.; ZHAO, C.; REN, X.; FENG, Y.; SHI, C.; ZHAI, W. Experimental investigation on the characteristics of the dynamic rail pad force and its stress distribution in the time and frequency domain. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 234, n. 2, p. 201-213, 2020.



2

Cheila Viegas
Luana Graziela Adam
Fernando Dal Pont Morisso
Marco Antônio Siqueira Rodrigues

ISOLADORES FRONTAIS E LATERAIS DO SISTEMA DE FIXAÇÃO *FASTCLIP*

INTRODUÇÃO

O conjunto de elementos que permitem o transporte dos trens, formado pelos elementos da superestrutura e da infraestrutura, é chamado de via permanente. A via com lastro é a mais frequentemente utilizada e consiste em uma composição de trilhos, sistemas de fixação, dormentes, lastro, sublastro e subleito.

O sistema de fixação desempenha um papel importante na confiabilidade da estrutura da via (Sadeghi; Seyedkazemi; Khajehdezfuly, 2020). Os componentes da fixação ferroviária, de forma solidária, mantêm os trilhos fixados aos dormentes, impedindo a sua movimentação. As forças exercidas no trilho, que devem ser suportadas pelo sistema de fixação, são causadas principalmente pela passagem dos trens e pelas mudanças de temperatura na ferrovia (Holder *et al.,* 2017; Sadeghi; Seyedkazemi; Khajehdezfuly, 2020). De forma geral, os sistemas de fixação devem atender às seguintes características: (i) manter a bitola da via; (ii) transferir os esforços verticais, horizontais e longitudinais do trilho para o dormente; (iii) atenuar as cargas e os impactos gerados pelo tráfego; (iv) promover o isolamento elétrico; e (v) proporcionar ao trilho uma inclinação em relação à vertical (Arema, 2016). O sistema de fixação fixa o trilho ao dormente e reduz a vibração e o ruído da via permanente, sendo o conjunto composto por ombreira, grampos, isoladores frontais e laterais e uma palmilha entre o trilho e o dormente (Yang *et al.,* 2020).

O aumento das cargas nos vagões de carga dos trens e da velocidade dos trens de passageiros tem levado a uma tendência de menor rigidez dos sistemas de fixação ferroviária, com maior deformação dos componentes resilientes (Liu *et al.,* 2017).

Além do aumento das cargas e da velocidade dos trens, o uso de trilhos continuamente soldados e de dormentes de concreto exige elasticidade adicional nos componentes da via. Isso se deve

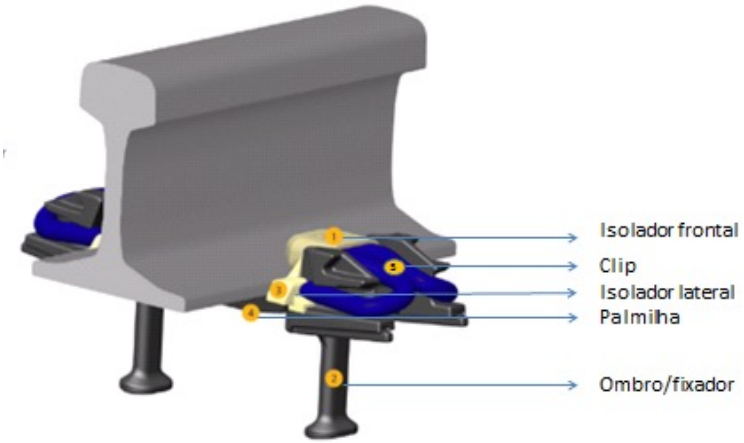
ao fato de esses componentes suportarem e protegerem o sistema contra maiores pressões de contato, causadas pelo aumento das restrições de movimento da estrutura em decorrência dos trilhos contínuos. Os sistemas de fixação elástica foram introduzidos para permitir maiores deformações dos componentes e para proporcionar a absorção das forças de impacto, que são maiores na via com dormentes de concreto protendido quando comparadas às da via com dormentes de madeira. O projeto do sistema de fixação elástica exige que o deslocamento de um de seus componentes, o grampo elástico, seja elevado, o que significa que a força de fixação envolve um deslocamento elástico considerável desse componente. A baixa rigidez e o maior deslocamento dos grampos elásticos no sistema de fixação tornam esses componentes menos suscetíveis à fadiga e à deterioração prematura decorrentes da passagem das cargas das rodas ferroviárias.

A Figura 1 apresenta um sistema *Fastclip* e seus elementos de fixação, descritos a seguir.

- **Ombreiras ou *shoulders*:** são feitas de ferro fundido, montados nos dormentes de concreto, e servem como suporte de fixação dos clipes nas extremidades fechadas e abertas, mantendo a largura necessária da via e resistência suficiente ao movimento lateral dos trilhos.
- **Grampos:** são elásticos, feitos de haste cilíndrica, para fornecer a pressão desejada ao trilho e ao dormente, permitindo a deformação elástica do trilho no plano horizontal sob a influência de forças laterais.
- **Isoladores:** são normalmente feitos de poliamida, garantem a transferência da pressão dos grampos elásticos ao patim do trilho e aumentam a resistência ao deslocamento longitudinal do trilho, assegurando a fixação necessária entre o trilho e o dormente.

- **Palmilhas de trilho:** são confeccionadas em polímeros que proporcionam maior resistência ao deslocamento longitudinal do trilho, sendo capazes de absorver energia (reduzindo as interações dinâmicas) e amortecer vibrações, o que promove a transferência de pressão para o assento do trilho (Sladkowski; Bizon, 2018; Carrascal *et al.*, 2021).

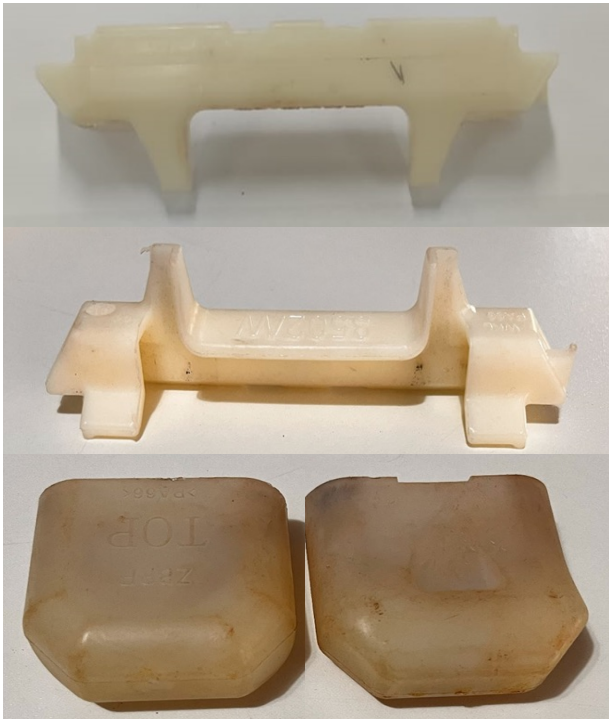
Figura 1 – Sistema de fixação *Fastclip* demonstrado no trilho



Fonte: adaptado de Carrascal **et al.** *(2021).*

Os grampos *Fastclip*, com isoladores frontais e isoladores laterais (Figura 2), são os componentes responsáveis por manter os trilhos apoiados nas palmilhas e fixados nos dormentes; eles prendem o trilho com tolerâncias aceitáveis e absorvem as forças exercidas sobre o trilho, transferindo-as aos dormentes. Os elementos poliméricos do sistema de fixação, uma vez que sofrem desgastes estruturais e dimensionais, fazem com que os isoladores comecem a perder sua função e contribuam para os danos aos outros elementos do sistema (Willians *et al.*, 2016).

Figura 2 – Isolador lateral e frontal modelo Fastclip



Fonte: acervo dos autores (2025).

Os principais fornecedores de sistemas de fixação apresentam uma extensa gama de produtos, sendo estes catalogados por códigos de acordo com cada fornecedor (Agico, 2019; Pandrol, 2019; Vossloh, 2019).

COMPOSIÇÃO DOS ISOLADORES FRONTAIS E LATERAIS

O conjunto de fixação *Fastclip* utilizado pelas ferrovias da Vale S.A. é composto por isoladores frontais e laterais de poliamida

6.6 (PA66). A poliamida (PA) é considerada um polímero semicristalino amplamente utilizado na indústria automotiva, aeronáutica e na construção civil, dentre outras. Possui capacidade de suportar temperaturas acima de 200 ºC, apresenta boa relação entre resistência e rigidez, é de fácil processamento, é quimicamente estável e resistente à abrasão (Mckeen, 2010). Por outro lado, possui caráter higroscópico elevado, ou seja, exibe tendência à absorção de água, o que é uma característica indesejada para o uso em isoladores de fixações ferroviárias localizadas em regiões de clima tropical (Wiebeck; Harada, 2005; Souza, 2018).

A absorção de umidade é um fenômeno significativo nas poliamidas e está diretamente relacionada ao grau de cristalinidade desses materiais. A estrutura das poliamidas apresenta regiões altamente ordenadas (cristalinas), nas quais as cadeias poliméricas estão compactamente arranjadas, e regiões amorfas, onde as cadeias estão desordenadas. A presença de grupos funcionais polares, tais como as amidas, nas moléculas das PAs torna esses polímeros higroscópicos, ou seja, com alta afinidade pela água. A absorção de umidade ocorre quando a água interage com os grupos funcionais polares presentes nas cadeias poliméricas, causando um aumento na quantidade de água retida no interior do material (Candau *et al.,* 2022). Quando a PA absorve água, ocorre um aumento nas dimensões do elemento de fixação, o que pode resultar em deformações dimensionais indesejadas. Além disso, a água pode atuar como plastificante, reduzindo a temperatura de transição vítrea (Tg) do polímero. Em termos de propriedades mecânicas, a absorção de umidade pode levar à redução da resistência mecânica e da rigidez da poliamida. A água atua como agente de enfraquecimento, facilitando o movimento das cadeias poliméricas e diminuindo a coesão entre elas. Além disso, a absorção de umidade pode levar à fragilização por hidrólise, especialmente em condições de altas temperaturas e elevada umidade (Arif *et al.,* 2014; Eftekhari; Fatemi, 2016; Malpot; Touchard; Bergamo, 2015).

A transição vítrea é um fenômeno que ocorre em materiais amorfos ou semicristalinos e corresponde ao evento térmico que ocorre em uma faixa de temperatura na qual o polímero sai de sua fase viscosa (elástica) e passa a apresentar comportamento vítreo (rígido), ou vice-versa. Trata-se de uma transição de segunda ordem (fenômeno termodinâmico associado a mudanças nas propriedades físicas do material, sem envolver mudança de fase), não podendo ser considerada uma mudança de estado físico. Na transição vítrea, e após ela, ocorrem mudanças significativas nas propriedades do material (Lorandi *et al.,* 2016).

Em estudo realizado por Malpot *et al.* (2015), amostras de poliamida 66 sem fibra e com 30% de fibra de vidro foram condicionadas de três formas diferentes: (i) um grupo de amostras foi seco a 35 ºC até atingir massa constante; (ii) outro conjunto de amostras foi imerso em água em temperatura ambiente até atingir massa constante; e (iii) o terceiro grupo foi mantido apenas em temperatura ambiente. As amostras secas alcançaram massa constante no 13º dia, e as imersas em água, no 25º dia. A determinação da Tg foi realizada por DSC, constatando-se que a temperatura de transição vítrea diminui com o incremento de umidade na amostra. Esse efeito está diretamente relacionado ao efeito plastificante que a água desempenha na poliamida: as moléculas de água substituem algumas ligações de hidrogênio entre as amidas, o que causa maior mobilidade na cadeia e, consequentemente, modificação da Tg. Nas propriedades mecânicas, os autores verificaram que a água diminui a rigidez e aumenta a viscosidade. A degradação é visível nas curvas tensão/deformação, por meio da observação da diminuição da tensão máxima e do módulo de Young, bem como do aumento da deformação na ruptura. O compósito PA66/fibra de vidro exibiu decréscimo nos valores de tensão e deformação até a falha e aumento nos valores de deformação na falha, porém o módulo de Young linear calculado não pareceu ser afetado pela umidade.

Broudin *et al.* (2015) determinaram o conteúdo de umidade em amostras de poliamida 66 e observaram que a água nas PAs é difundida na parte amorfa do polímero, bem como que essa difusão ocorre por meio de *clusters* atribuídos à formação de pontes de hidrogênio entre as moléculas de água. O aumento da temperatura eleva a mobilidade da cadeia e, por consequência, o coeficiente de difusão. Quando a temperatura está acima da Tg (60 ºC, 70 ºC e 80 ºC), observa-se aumento da difusão; quando está abaixo, verifica-se uma variação mais complexa. Isso pode ser explicado pela modificação da fase amorfa devido ao decréscimo da Tg em decorrência da adição de água ao polímero. A Tg cai de 55 ºC a uma umidade de 5% para 0 ºC, com hidratação de 80%. Essa variação da Tg induz uma mudança da fase amorfa do polímero do estado vítreo para o borrachoso e, consequentemente, uma modificação do comportamento do material. Enquanto a Tg está acima da temperatura de 25 ºC utilizada no ensaio, a fase amorfa do polímero permanece em estado vítreo e o coeficiente de difusão da água é quase constante. Contudo, quando a absorção de água é suficientemente alta para diminuir a temperatura de transição vítrea abaixo da temperatura de teste, a fase amorfa está então em um estado emborrachado, e o coeficiente de difusão da água aumenta significativamente com a atividade de água (AA). Esse comportamento já foi observado em resinas epóxi, nas quais a difusão aumenta de acordo com o aumento da atividade de água. Para uma atividade de água de até 0,4, o coeficiente de difusão da água na PA é praticamente constante; por outro lado, para valores acima de 0,6, ele aumenta consideravelmente, por um fator de 5.

Estudo semelhante foi publicado por Arif *et al.* (2014), utilizando poliamida 66 com 30% de fibra de vidro. Foram utilizadas três condições, que inicialmente estavam a 23 ºC. A primeira, a 0% de umidade relativa (RH0), consistiu em secagem a 80 ºC em estufa durante 15 horas. A segunda, com umidade relativa de 50% (RH50), na qual a amostra foi inicialmente condicionada em câmara climática a 70º C, com 62% de umidade relativa, até massa constante e, em

seguida, mantida por uma semana a 23 ºC e 50% de umidade, para manutenção da umidade no interior da amostra. A última condição considerou 100% de umidade (RH100), por imersão em água em ebulição durante 35 horas, seguida de imersão em água à temperatura ambiente de 23º C durante uma semana. Como resultado, foi possível verificar que a força de flexão e a rigidez do material diminuem conforme aumenta o teor de umidade.

As diferenças notáveis nos valores de força e módulo foram atribuídas ao efeito plastificante da água no compósito. Em RH0, o compósito apresenta comportamento vítreo (Tg>Tambiente); em RH50, está no ponto de transição (Tg = Tambiente); e, em RH100, apresenta comportamento borrachoso (Tg<Tambiente). O alongamento na ruptura é maior para RH50 e RH100, enquanto o aumento da deformação até a ruptura, devido à umidade relativa mais alta, é perceptível para a poliamida 66 pura. A análise de MEV da superfície de ruptura mostra que, para a amostra RH0, com o aumento da carga (30%), começa a ser possível notar dano inicial de descolagem interfacial no final da fibra, e algumas quebras de fibra também são observadas. Também é percebida deformação da matriz polimérica em locais onde existem fibras muito próximas umas das outras. Os autores supõem que o dano também pode iniciar nessas regiões devido ao aumento das tensões locais. Conforme a carga aumenta, o dano se propaga através da interface fibra/matriz, e acontecem quebras de fibras em mais regiões. Em altos estresses relativos de flexão (95%), ocorrem microfraturas nas regiões nas quais as fibras quebradas estão próximas umas das outras. Para RH50, a 30% de estresse flexural relativo, o dano é iniciado por meio de descolamento interfacial, mas não apenas no final da fibra, como também em várias regiões onde as fibras estão mais próximas umas das outras, e, então, se propaga pela interface, tanto na região do plano quanto em outras direções.

Em altíssimos estresses flexurais relativos (98%), pequenas quebras da matriz são observadas. Além disso, zonas locais sob tensão ao redor da fibra e descolagem da interface fibra/matriz também são

evidenciadas. Para RH100, inicialmente foi observado o mesmo comportamento que para RH50, com dano iniciado pelo descolamento interfacial, não apenas no final da fibra, mas também em várias regiões onde as fibras estão mais próximas umas das outras. Em comparação com RH50, a amostra RH100 possui um número significativamente maior de áreas danificadas e maior ocorrência de microfissuras e regiões de deformação na matriz. No que diz respeito às propriedades térmicas, a absorção de umidade pode afetar também as propriedades de resistência ao calor. A presença de água pode levar à degradação térmica acelerada devido à hidrólise, resultando em uma redução da vida útil do material.

Chaichanawong, Thongchuea e Areerat (2016) avaliaram o comportamento entre 1 e 60 dias com os corpos de prova imersos em água (PA 0%, PA 10%, PA 20% e PA 30% de fibra de vidro). Inicialmente, foi observado que o conteúdo de umidade diminuiu com o aumento da porcentagem em peso da fibra de vidro nos compósitos de fibra/poliamida. O teor de umidade absorvido de todas as amostras aumentou com o tempo de imersão e atingiu a saturação em torno de 50 dias após a imersão. O comportamento de absorção de umidade das amostras pôde ser dividido em quatro etapas, descritas a seguir: (I) dias 1-7, início: foi observada rápida absorção de umidade; (II) dias 8-24: redução da absorção de umidade; (III) dias 25-35, próximo ao estágio de saturação: maior redução da taxa de absorção de umidade; (IV) dias 36-60, fase de saturação: a taxa de absorção foi quase constante, e a saturação foi então alcançada. Do ponto de vista das propriedades mecânicas, a resistência ao escoamento e a resistência à tração final de todos os corpos de prova diminuíram significativamente no estágio I e diminuíram levemente no estágio II. Essas propriedades mecânicas se mostraram quase constantes nos estágios III e IV.

O módulo de elasticidade de todas as amostras diminuiu nos estágios iniciais (estágios I e II) e, em seguida, diminuiu significativamente no estágio III, porém manteve-se quase constante no estágio IV. No entanto, a ductibilidade de todas as amostras não mudou nos

estágios I e II, mas aumentou significativamente no estágio III e novamente manteve-se quase constante no estágio IV. Na resistência à flexão, semelhante ao efeito do teor de umidade no limite de escoamento e na resistência à tração final, todas as amostras apresentaram menores valores no estágio I e pouca alteração no estágio II. Isso foi atribuído à redução da resistência ao cisalhamento interfacial da fibra de vidro com a poliamida após a imersão em água. Por fim, a resistência à flexão foi quase constante nos estágios III e IV. Os autores observaram também que maiores teores de fibra de vidro resultam em menor alteração nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Eftekhari *et al.* (2016) verificaram que, para amostras de poliamida imersas em água até saturação e, em seguida, secas em estufa até massa constante, o grau de cristalinidade da amostra seca é maior do que o da amostra testada logo após a injeção, ou seja, antes de sofrer um ciclo de umidificação e secagem. A temperatura de fusão mais baixa registrada para amostras envelhecidas sugere a formação de uma estrutura cristalina mais organizada, o que resulta também em aumento da rigidez e da resistência à tração da amostra. A umidade difundida na cadeia da poliamida pode causar hidrólise, que consiste na ruptura da cadeia principal do polímero devido a uma reação entre uma molécula de água e outro grupo químico, tal como éster ou amida. Nesta situação, observa-se a ruptura da ligação do grupo funcional e a adição de hidrogênio e hidroxila a cada um dos terminais remanescentes. As condições ambientais características da Estrada de Ferro Carajás, marcadas por elevadas temperaturas, favorecem a aceleração da hidrólise, tornando essa região especialmente suscetível a esse processo. Essa quebra na cadeia polimérica causa redução da massa molar e alterações nas propriedades. A cadeia da poliamida 66 é polar, portanto atrai as moléculas de água, que se depositam entre as ligações de hidrogênio na fase amorfa.

Estudos avaliaram o comportamento da poliamida no teste de envelhecimento utilizando uma câmara UV. Foram efetuados 125 ciclos de 12 horas (8 horas sob luz UV a 60 ºC e 4 horas a 50 ºC sem

luz), com eventual *spray* de água para simular orvalho. No ensaio mecânico de tensão/deformação, foi constatada fragilização nas amostras após envelhecimento. As lamelas cristalinas da poliamida, com o intemperismo, engrossam por meio de um processo chamado "cristalização química". Os fragmentos de cadeia resultantes da cisão da fase amorfa podem recombinar-se com a fase cristalina. A fragilização em polímeros semicristalinos está ligada à diminuição do emaranhamento na fase amorfa (como nos polímeros amorfos), à perda de moléculas de ligação e ao encolhimento da distância interlamelar entre os cristais.

A mudança relativa de alongamento na ruptura foi proeminente para todas as poliamidas com tratamento, com as maiores reduções na resistência à tração final. Poliamidas não tratadas foram o material mais sensível ao intemperismo, dentre o conjunto de amostras ensaiadas. As únicas mudanças significativas no módulo de elasticidade ocorreram para materiais reforçados: PA12 e PA66 com fibra de vidro ou dissulfeto de molibdênio. Ambos os materiais com fibra de vidro tornaram-se mais dúcteis devido ao intemperismo. Essa observação foi ainda estudada por microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura. Constatou-se que os tratamentos aplicados, e principalmente os estabilizadores UV ou aditivos administrados como parte do composto plástico, reduzem a fragilidade e minimizam as alterações no comportamento do material (Puttonen *et al.,* 2021).

Para mitigar os efeitos adversos da absorção de umidade, algumas estratégias podem ser adotadas. Uma delas é a utilização de poliamidas com maior grau de cristalinidade, uma vez que isso reduzirá a taxa de absorção de umidade. Além disso, a aplicação de tratamentos de superfície ou o uso de revestimentos impermeáveis pode minimizar os efeitos da umidade ambiente. Também é possível adicionar aditivos hidrofóbicos durante o processamento do polímero (Shurpali *et al.,* 2014).

PROPRIEDADES DOS ISOLADORES FRONTAIS E LATERAIS DE POLIAMIDA 66 E DOS POLÍMEROS ALTERNATIVOS

Como polímeros alternativos à PA66, foram pesquisados sulfeto de polifenileno (PPS), com uma Tg naturalmente mais alta do que a da poliamida; polibutileno tereftalato (PBT), com Tg próxima à da PA66; polioximetileno (POM).

O objetivo foi avaliar polímeros que tenham temperaturas de transição vítrea em diferentes faixas. Após estudo teórico de propriedades, o PBT não foi utilizado como polímero alternativo para testes, pois, apesar de apresentar menor interação com a água e propriedades próximas às da poliamida, a Tg teórica está dentro da faixa de trabalho das peças na ferrovia, sendo praticamente igual à Tg da PA66. Tanto o PPS quanto o POM têm menor interação com a umidade que a poliamida e Tg em faixas bem diferentes, o que é interessante para a avaliação sobre se um comportamento rígido ou elástico seria mais indicado para aplicação em ferrovias. Essa possibilidade de ensaio se baseia no fato de que os isoladores frontais e laterais sofrem tanto por problemas de quebra por fadiga quanto por desgaste por abrasão.

O polímero sulfeto de polifenileno possui natureza hidrofóbica devido à presença do enxofre em sua estrutura química. Essa característica hidrofóbica é uma das razões pelas quais o PPS é amplamente utilizado em aplicações que envolvem exposição a ambientes úmidos ou contato com líquidos. No entanto, apesar de ser hidrofóbico, o PPS pode sofrer poucas interações com a umidade presente no ambiente (Chen *et al.*, 2004; Sukumaran *et al.*, 2017). A temperatura de transição vítrea do sulfeto de polifenileno

é relativamente alta, se comparada aos demais polímeros, e está situada entre 85 °C e 110 °C. É importante mencionar que a Tg do PPS pode variar ligeiramente dependendo da formulação específica do polímero, das condições de processamento e das propriedades desejadas no material final. O PPS é conhecido por exibir alta cristalinidade em sua estrutura molecular, pois a presença de anéis fenilênicos e ligações de sulfeto na cadeia polimérica contribui para um arranjo mais ordenado.

A cristalinidade do PPS também influencia suas propriedades mecânicas. Polímeros mais cristalinos tendem a ter maior rigidez e resistência, enquanto polímeros amorfos podem ser mais flexíveis. A quantidade e o tamanho das regiões cristalinas no PPS podem ser controlados por meio de diferentes técnicas de processamento, como resfriamento controlado e tratamentos térmicos. Aumentar a cristalinidade geralmente leva a um aumento na resistência mecânica e na rigidez do polímero, mas também pode torná-lo mais quebradiço (Oshima *et al*., 2023; Quan *et al*., 2023; Sukumaran *et al*., 2017).

Por sua vez, o POM possui certa afinidade pela água, o que significa que pode absorver quantidades de água ao longo do tempo. A absorção de água pode influenciar propriedades como a resistência mecânica, a resistência à tração e a resistência ao impacto. Quanto à sua Tg, está na faixa de -30 ºC a -70 ºC, o que faz com que o POM seja uma escolha interessante para avaliar como um polímero com comportamento borrachoso se comportaria quando submetido a tensões cíclicas, como ocorre numa ferrovia durante a passagem de trens sobre um determinado ponto. As unidades repetitivas de oximetileno estão dispostas linearmente, formando uma cadeia longa. Essa estrutura contribui para boa rigidez e resistência do polioximetileno. Em condições úmidas, essas propriedades podem ser ligeiramente reduzidas devido à hidratação na cadeia polimérica. Nesse sentido, o POM pode sofrer inchaço devido à absorção de água e sofrer mudanças dimensionais, e isso deve ser considerado em aplicações nas quais a estabilidade dimensional é crítica (Zhang *et al*., 2017).

Tendo em vista que os isoladores de PA66 apresentam temperatura de transição vítrea menor do que a temperatura de trabalho, devido ao teor de umidade absorvido tanto no seu processo de produção no fornecedor quanto durante a aplicação, quando expostos às intempéries na ferrovia, isso afeta diretamente a eficácia no aperto necessário às fixações. Apesar de a PA66 ter obtido o maior valor de módulo na ruptura, também obteve valor alto de alongamento, o que mostra que, sob tensões, o material tende a escoar. Isso representa um risco, uma vez que, durante a passagem dos trens, o conjunto de fixação sofre tensões cíclicas, favorecendo seu aquecimento e aumentando ainda mais a possibilidade de deformação. Por isso, o PPS apresenta-se como uma possível alternativa de material mais rígido, com menos interação com a umidade e maior amplitude de faixa de temperatura de trabalho, uma vez que apresenta Tg mais alta e é menos propenso à diminuição, devido à menor interação com a umidade.

O grau de cristalinidade do PPS está diretamente correlacionado com suas propriedades mecânicas e térmicas. Um aumento no grau de cristalinidade tende a melhorar a resistência mecânica e a estabilidade dimensional, mas pode diminuir a tenacidade e a resistência ao impacto, devido à maior rigidez das regiões cristalinas. A presença de anéis aromáticos na cadeia do polímero, como ocorre no PPS, pode ter influência significativa nas propriedades térmicas, como temperatura de fusão e cristalização. A presença de anéis aromáticos geralmente aumenta a rigidez da cadeia polimérica. O grau de cristalinidade para polímeros semicristalinos como a PA66, o PPS e o POM varia dependendo das condições de processamento, como a taxa de resfriamento, o histórico térmico e a presença de aditivos. A literatura (Quan *et al.,* 2023; Sukumaran *et al*., 2017) apresenta os seguintes graus de cristalinidade:

- **PA66:** apresenta grau de cristalinidade que varia de 30% a 50%, em função da estrutura semicristalina, que é altamente influenciada pela taxa de resfriamento durante o processamento. Um resfriamento rápido, como na moldagem por injeção, pode reduzir a cristalinidade, enquanto um resfriamento mais lento ou tratamentos térmicos podem aumentá-la;

- **PPS:** apresenta grau de cristalinidade variando entre 55% e 65%, comumente observado em amostras processadas industrialmente. O polímero cristaliza facilmente mesmo em condições de resfriamento rápido;

- **POM:** apresenta grau de cristalinidade que varia de 50% a 75%, considerando que valores abaixo dessa faixa remetem a problemas de processamento e que valores acima são possíveis com controle rigoroso no processamento.

Outras características importantes a serem avaliadas são o módulo de armazenamento (E′) e a tangente delta (tan δ). O módulo de armazenamento reflete a capacidade do material de armazenar energia elástica durante a deformação. Ele está relacionado com a rigidez do material em diferentes temperaturas e condições de solicitação mecânica. Um valor alto indica que o material é rígido e resistente à deformação elástica. Materiais com valores mais baixos são mais flexíveis. O E′ muda com a temperatura, revelando as faixas de temperatura em que o material mantém sua rigidez ou se torna mais flexível. Um decréscimo acentuado no E′ sinaliza a transição para um comportamento mais viscoelástico, por exemplo, a transição vítrea.

A tangente delta é a razão entre o módulo de perda e o módulo de armazenamento e indica o comportamento viscoelástico global do material. Valores altos de tan δ indicam que o material apresenta menor módulo de armazenamento, com comportamento menos rígido ou mais resiliente, com tendência a dissipar mais energia. Valores baixos sugerem que o material é predominantemente elástico. O máximo do sinal de tangente delta geralmente ocorre próximo à Tg,

já que marca a temperatura em que a dissipação de energia é máxima (He *et al*., 2021; Mckeen, 2010). Todas essas considerações sobre as propriedades termomecânicas dos materiais poliméricos utilizados em ferrovias são um conhecimento valioso para a interpretação dos comportamentos, bem como das causas e consequências dos eventos que normalmente são verificados na rotina de manutenção das vias.

RESULTADOS DOS TESTES NOS ISOLADORES FRONTAIS E LATERAIS DE PA66 E DOS CORPOS DE PROVA DOS POLÍMEROS ALTERNATIVOS INJETADOS

A empresa fabricante de isoladores escolhida para ser avaliada foi a Wirklich. A empresa destaca que, para melhorar as propriedades de maleabilidade da poliamida, o processo fabril considera uma etapa descrita internamente como cozimento. Nesse procedimento, as peças de isoladores frontais e laterais são aquecidas em água durante uma hora, para atingirem saturação de umidade. Posteriormente, passam por um processo de secagem, que visa retirar o excesso de água, mas que não é suficiente para garantir que seja atingida massa seca constante, e, então, o material é embalado para ser enviado à ferrovia. Assim, pode-se presumir que os isoladores saem do fabricante com algum grau de hidratação não mensurado, o que interfere diretamente na temperatura de transição vítrea e nas propriedades mecânicas esperadas do polímero no estado seco. Nos locais de armazenamento próximos às ferrovias, os isoladores ficam estocados nos próprios sacos nos quais foram enviados pela fabricante; porém, muitas vezes, os sacos estão mal fechados e, em alguns casos, em locais sem cobertura e, assim, expostos continuamente a intempéries, radiação

solar intensa, altas temperaturas e contaminações, como poeira e partículas metálicas, umidade, agentes biológicos e até substâncias químicas presentes no ambiente. Tanto na região da Estrada de Ferro Carajás quanto na Estrada de Ferro Vitória a Minas, o clima tropical é quente e com alto teor de umidade do ar, o que contribui para manter a hidratação que os isoladores retêm desde o processo produtivo. Isso é um indicativo de que a Tg dos isoladores frontais e laterais utilizados pela Vale pode estar abaixo do valor padrão esperado para poliamidas.

De acordo com teste de fadiga efetuado no Laboratório de Acústica e Ensaios Dinâmicos e Estáticos (LAEDE), na cidade de São Paulo, o isolador frontal é principalmente afetado pelo desgaste por abrasão. Esse desgaste faz com que ele perca massa na região de contato com o trilho e diminua a pressão exercida pelo conjunto de fixação. Tendo em vista as diferentes solicitações que cada posição exige, talvez seja necessário considerar dois polímeros diferentes para aplicação em cada isolador; portanto, pode ser interessante considerar materiais com comportamentos distintos quando submetidos a tensões cíclicas.

Foram realizadas análises em laboratório durante o estudo que envolveu os isoladores frontais e laterais novos, fornecidos pela Vale, fabricados na empresa Wirklich, e as peças injetadas dos polímeros PPS natural (FORTRON FX4382T1), PPS com 30% de fibra de vidro (FORTRON FX530T4) e POM natural (HOSTAFORM S9364), fornecidos em *pellet* por uma empresa fornecedora do material em questão.

Pela análise dinâmico-mecânica (DMA), antes do intervalo de temperatura da Tg, entre 40 ºC e 50 ºC (temperaturas atingidas frequentemente na ferrovia Carajás), os isoladores de PA66 apresentam valores de módulo de armazenamento entre 200 e 250 MPa. Depois desse intervalo, o valor do módulo de armazenamento é reduzido para entre 50 MPa e 100 MPa. Isso evidencia que, na temperatura de trabalho das peças, elas apresentam um comportamento bem menos rígido do que o esperado se estivessem em condição sem umidade, na qual a Tg corresponderia a valores próximos aos da literatura. Nesse

contexto, a PA66 sofre alterações significativas em suas propriedades quando em meio com umidade expressiva, de acordo com a literatura (Quan *et al*., 2023).

Para o PPS, considerando o intervalo de temperatura entre 40 ºC e 50 ºC, o módulo de armazenamento apresenta valores entre 150 MPa e 170 MPa, maiores do que os encontrados para a PA66. Isso denota que o PPS é mais rígido e resistente à deformação do que o isolador atual. A Tg encontrada está de acordo com a literatura, na faixa dos 80 ºC.

Já o POM apresenta Tg abaixo da temperatura ambiente e dois valores mensuráveis. Os dois valores de Tg são associados a diferentes segmentos da cadeia polimérica, cada um com suas próprias características de mobilidade molecular. O primeiro, em torno de -70 ºC, pode ser associado aos segmentos mais curtos da cadeia polimérica ou a regiões amorfas com maior mobilidade, enquanto o segundo, em torno de -30 ºC, pode ser relacionado a segmentos mais longos ou a regiões amorfas com menor mobilidade. Isso pode ser resultado de diferentes processos de cristalização ou de diferentes condições de processamento durante a injeção do POM (He *et al*., 2021; Rémond; Védrines, 2004).

Materiais que apresentam maior alongamento na ruptura tendem a ser mais tenazes e resistentes a impactos, pois têm maior capacidade de absorção de energia antes da ruptura (Eftekhari; Fatemi, 2016; He *et al.,* 2021; Sayer, 2014). Assim, o POM apresenta o maior alongamento, porém com o menor módulo de ruptura e de Young, o que sugere que é o menos rígido entre as amostras. Além disso, não existiu diferença nos valores do PPS com e sem fibra de vidro. Por outro lado, apesar de os valores de tensão da PA66 e do PPS estarem próximos, o módulo de Young de cada um deles é bem diferente. O valor mais baixo para o módulo de Young da PA66 sugere ao material um estado flexível e maleável e que, ao se aplicar carga em uma peça desse material, ela tenda a deformar significativamente antes de rom-

per. Ao contrário, o PPS tende a sofrer pouca deformação antes do rompimento quando aplicada carga.

GEOMETRIA DOS ISOLADORES FRONTAIS E LATERAIS

A utilização das vias de forma intensiva promove o desgaste acelerado de diversos componentes. Desgaste esse que está relacionado às tensões e aos esforços causados pela passagem dos trens e às condições ambientais ao longo das ferrovias. Nesse sentido, toda vez que um elemento de via permanente tem que ser substituído ou reparado, ocorre a interdição da ferrovia, prejudicando a circulação dos trens e, por consequência, interferindo no transporte de cargas.

Ao diminuir a necessidade de substituição de elementos da via permanente, tem-se maior disponibilidade da ferrovia para o tráfego de trens de carga e de passageiros. Para estender a vida útil dos componentes e reduzir o custo de manutenção de vias, é importante identificar as cargas dinâmicas suportadas pelos componentes e os danos sofridos por eles (Zhang *et al.,* 2020; Rhodes, 2021). Diversos estudos apontam as palmilhas como elemento principal de falhas no sistema de fixação, tratando-se de um objeto de interesse para a maioria dos autores (Guan *et al.,* 2019; Yang *et al*., 2020; Zhang *et al*., 2020; Sadeghi; Seyedkazemi; Khajehdezfuly, 2020; Xu *et al*., 2020).

A geometria dos isoladores, tanto frontal como lateral, não representa um foco de estudo das pesquisas voltadas para ferrovias e seus componentes, sendo um estudo inovador, sem referências anteriores. Dessa forma, a identificação das principais causas de falha dos isoladores se fez necessária para o desenvolvimento de novas geome-

trias. As inspeções visuais da ferrovia e as simulações computacionais foram de extrema importância para obter informações relacionadas às falhas e à geometria dos isoladores.

ISOLADOR FRONTAL

A análise visual dos componentes de fixação, durante visita técnica à EFC em Açailândia (MA), mostrou que, nas fixações em que o grampo estava solto, os isoladores lateral e/ou frontal apresentavam danos físicos. Essa observação sugere que a falha em um componente afeta os demais, mas, ao mesmo tempo, não foi possível identificar qual elemento sofreu o primeiro dano. A maioria dos isoladores frontais removidos da via permanente apresentou dano por abrasão, que pode ser observado na Figura 3. Os danos por abrasão devem-se à fricção constante na face do isolador que entra em contato com o trilho. Com a passagem das composições ferroviárias, o trilho realiza movimentos laterais cíclicos, promovidos pelas forças horizontais que atuam no sistema. Esses movimentos e as variações de temperatura na ferrovia possivelmente são responsáveis pelos danos dos isoladores frontais. Nesse processo, ocorre a perda de massa na região do isolador em contato com o trilho e a consequente redução da carga de retenção do sistema de fixação.

Figura 3 – Danos causados nos isoladores nas ferrovia

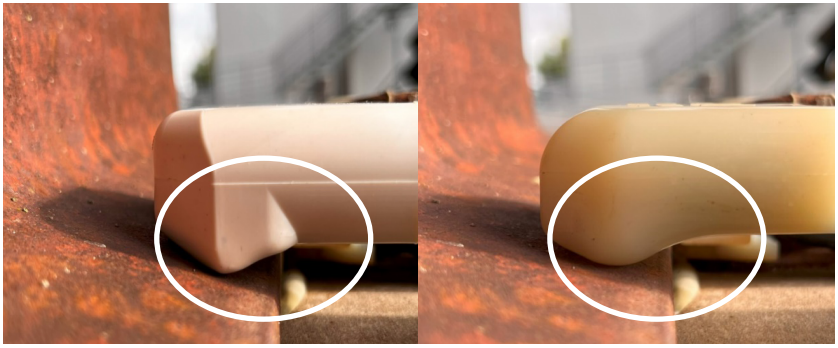


Fonte: acervo dos autores (2025).

Ao observar os danos do isolador frontal na Figura 3 e seu acoplamento ao trilho na Figura 4, verifica-se que a região de contato com o trilho é limitada e, por consequência, as forças de atrito se concentram nessa região. Mudanças na geometria podem aprimorar o acoplamento, aumentando a área de contato e promovendo uma distribuição de cargas mais eficiente.

Na Figura 4, observa-se a geometria de contato com o trilho (regiões circuladas) para os isoladores frontais com nova geometria (esquerda) e geometria atual (direita). Na imagem da esquerda, o ponto máximo da curvatura foi deslocado para baixo (região circulada), quando comparado com a imagem da direita. O objetivo dessas mudanças é reduzir o desgaste por abrasão, que ocorre acima do ponto máximo de curvatura. Essa região do isolador sofre desgaste devido aos movimentos horizontais do trilho, que promovem perda de massa e, devido ao aquecimento causado pelo atrito, deformação do material polimérico. A mudança do ponto máximo promove um melhor acoplamento à base do trilho, conforme a Figura 4, reduzindo o atrito. Se compararmos o isolador com a geometria modificada (1), Figura 4 – esquerda, a base possui um apoio maior que no isolador de geometria atual (2), Figura 4 – direita.

Figura 4 – Posicionamento do isolador frontal ao trilho: esquerda – geometria 1; direita – geometria 2



Fonte: acervo dos autores (2025).

Um incremento milimétrico foi aplicado à nova geometria, apenas na região de contato com o trilho, com o objetivo de reduzir o impacto da perda de massa nessa região. Abordaremos os resultados práticos no item "Ensaios de desgaste acelerado".

ISOLADOR LATERAL

Durante a visita técnica à EFC, em Açailândia (MA), foram identificados diversos isoladores laterais danificados. A identificação das falhas foi determinante para guiar os estudos de simulação computacional. Na Figura 5, pode-se verificar o isolador lateral apresentando dano por compressão na face de contato com o trilho. Esse dano tende a ser produzido pelas forças atuantes no sistema, que promovem movimentos laterais cíclicos que projetam o trilho na direção dos isoladores, como foi sugerido para os isoladores frontais.

Figura 5 – Isolador com face desgastada, removido da via



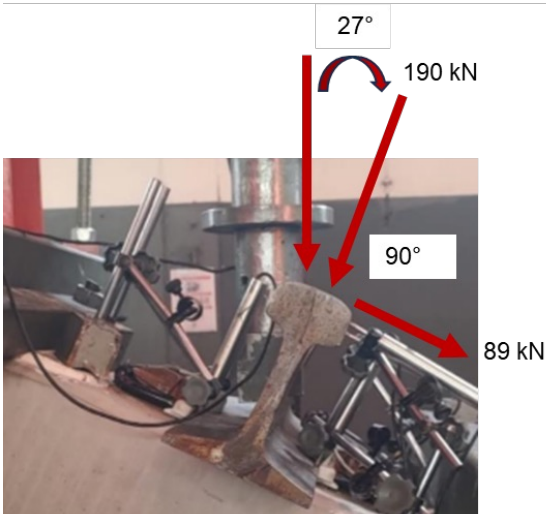
Fonte: acervo dos autores (2025).

Para entender melhor os esforços sofridos pelo isolador lateral e a dissipação das cargas recebidas por ele, utilizaram-se simulações computacionais pelo método de elementos finitos (MEF).

O método de elementos finitos trata-se de uma modelagem que foi desenvolvida no início dos anos 1960 para resolver problemas estruturais no campo aeroespacial e, atualmente, ainda é uma ferramenta bem aceita e poderosa na pesquisa científica. Ele foi adaptado da área de engenharia e é amplamente aplicado em diversas outras áreas (Gonçalves *et al.*, 2022). Neste estudo, foi utilizado, nas simulações computacionais, o *software* Solidworks 2020-2021 Education Edition, que apresenta as ferramentas necessárias para uma simulação simples, avaliando apenas as mudanças de geometria.

A definição das forças foi baseada no histórico de transporte e nas condições das ferrovias em questão, sendo considerada como aplicação crítica a posição do trilho em um plano inclinado a um ângulo $\alpha = 27^{o}$ e uma carga aplicada de 190 kN (corresponde à carga por eixo das composições de carga). Esses dados foram enviados pela Engenharia da EFC. A Figura 6 mostra o posicionamento do trilho e do dormente inclinados a 27º, a carga aplicada sobre o trilho e a decomposição dessa carga; a carga lateral resultante é de aproximadamente 86 kN.

Figura 6 – Imagem representativa das forças atuando sobre o trilho inclinado



Fonte: acervo dos autores (2025).

Através das simulações computacionais, pode-se observar a distribuição das forças ao longo do isolador lateral para diferentes geometrias.

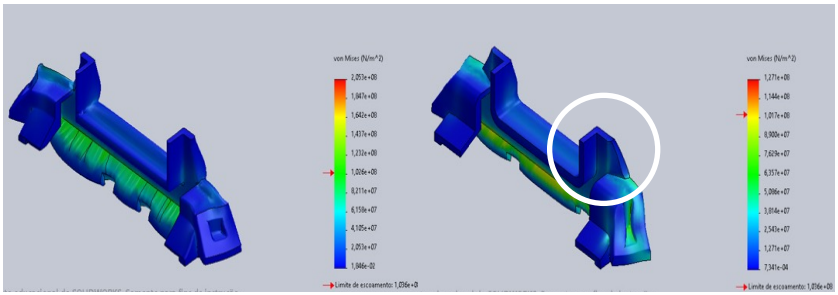
Foram realizados testes com diferentes forças aplicadas (40, 60, 80 e 100 kN), com a finalidade de estudar o comportamento das geometrias. Observou-se que, para as quatro forças aplicadas, os isoladores apresentaram o mesmo comportamento; sendo assim, serão discutidos apenas os testes com maior carga aplicada.

As alterações na geometria dos isoladores laterais partiram das dimensões geométricas do isolador utilizado atualmente nas ferrovias estudadas. Ao longo do desenvolvimento do estudo, quatro diferentes geometrias foram testadas, e, neste capítulo, serão apresentados os resultados da geometria com melhor desempenho.

Na Figura 7, observam-se as tensões resultantes após a incidência de uma carga de 100 kN. A seta em vermelho indica o limite de escoamento do material utilizado. Evidencia-se que a tensão máxima

atingida para o isolador com geometria 1 é praticamente o dobro do limite de escoamento (2,053 .10^8 N/m^2 e 1,036 .10^8 N/m^2, respectivamente). Enquanto, para o isolador com geometria 2, a tensão máxima foi de 1,27.10^8 N/m^2, 20% acima do limite de escoamento. Isso mostra que o isolador 1 sofrerá maior deformação que o isolador 2 quando aplicada uma força de 100 kN, pois as tensões máximas resultantes representam o escoamento do material.

Figura 7 – Tensões resultantes para 100 KN para Isolador 1 (esquerda) e 2 (direita)

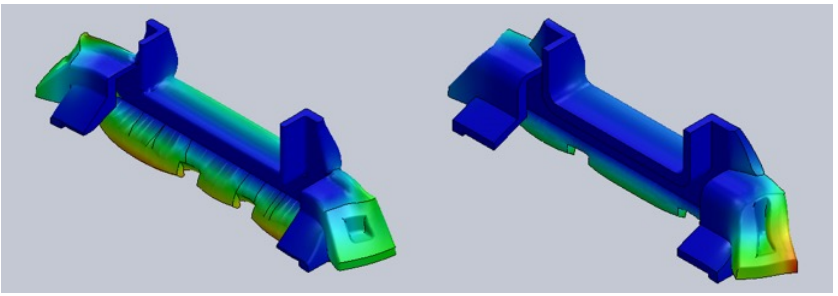


Fonte: adaptado de SolidWorks (2024).

Esse comportamento observado em relação às tensões pode ser considerado um indício de que a geometria do isolador 2 distribui as forças aplicadas para as laterais – região marcada com círculo vermelho na Figura 8 (direita)–, diminuindo as tensões máximas na região onde a força é aplicada. O que também explica que as maiores deformações do modelo 2 ocorrem nas extremidades. Os dados de deslocamento reforçam a estabilidade da geometria 2.

Na Figura 8, o isolador 1 (esquerda) apresenta várias zonas com deslocamento, enquanto o modelo 2 (direita) apresenta um deslocamento mais concentrado nas laterais externas.

Figura 8 – Deslocamentos resultantes
para 100 KN para Isolador 1 (esquerda) e 2 (direita)



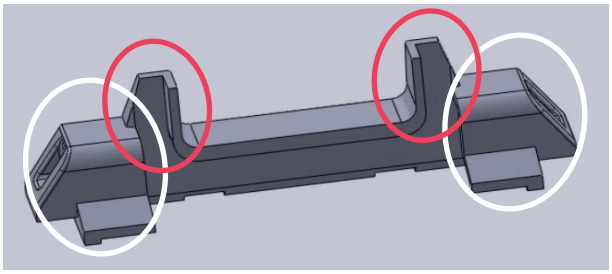
Fonte: adaptado de SolidWorks (2024).

NOVA GEOMETRIA DOS ISOLADORES LATERAIS

As observações provenientes de atividades práticas em ferrovias e os dados das simulações no *software* SolidWorks resultaram nas mudanças propostas para a geometria do isolador lateral.

A Figura 9 apresenta a imagem do isolador modificado. Nesse modelo, foi realizado um incremento na espessura das superfícies de apoio que ficam em contato com a ombreira, zonas circuladas em azul. O objetivo foi promover mais sustentação nas bordas da ombreira. Nas simulações, como demonstrado na Figura 8, essa região sofre maior deformação quando submetida às forças de esmagamento.

Figura 9 – Desenho do isolador lateral com as modificações de geometria



Fonte: acervo dos autores (2025).

Na Figura 10, pode-se observar o posicionamento do isolador lateral, utilizado atualmente na ferrovia, na ombreira, bem como a superfície que fica em contato com o trilho. Conforme citado anteriormente, o isolador deve possibilitar o encaixe perfeito entre a ombreira, o trilho e o clip; logo, a maioria de suas dimensões deve ser mantida.

Nas atividades práticas de substituição dos elementos de fixação, verificou-se que o encaixe do isolador na ferramenta de aperto do grampo é de suma importância para viabilizar seu uso sem a necessidade de mudanças de ferramental ou de procedimentos. As aletas de fixação da ombreira, zonas circuladas em vermelho na Figura 10, foram mantidas com dimensões adequadas para encaixe na ferramenta de aperto utilizada nas manutenções da ferrovia.

Figura 10 – Isolador posicionado na ombreira



Fonte: acervo dos autores (2025).

ENSAIOS DE DESGASTE ACELERADO

Para avaliar as geometrias propostas, fez-se necessário o uso de um dispositivo que simula os esforços sofridos pelo sistema de fixação e cujo funcionamento se dá em ciclos, considerando que cada ciclo representa a passagem de uma roda das composições ferroviárias. Os testes foram realizados segundo a norma EN 13146-4:2020, com a duração de 6 milhões de ciclos. Os testes de desgaste foram efetuados no Laboratório de Acústica e Ensaios Dinâmicos e Estáticos (LAEDE), na cidade de São Paulo.

Nesse dispositivo, foram realizados os testes de desgaste acelerado dos isoladores com nova geometria, com o intuito de avaliar o aumento de vida útil dos elementos de fixação, considerando o número de ciclos suportados até a falha.

Na Tabela 1, podem ser encontrados os resultados para os isoladores laterais e frontais nas duas geometrias. Os Isoladores 2 representam as novas geometrias propostas. Para o isolador lateral, a geometria proposta tem a finalidade de dissipar as cargas da face de contato com o trilho, enquanto as mudanças no isolador frontal promovem melhor acoplamento ao trilho. Esse novo conjunto de fixação apresentou uma média de 1.068.000 ciclos até o momento do dano estrutural. O dano estrutural ocorreu devido à quebra do isolador lateral; o isolador frontal se manteve íntegro e próprio para uso mesmo após os 1.068.000 ciclos.

Os Isoladores 1, com geometria utilizada atualmente nas ferrovias, apresentaram resistência de 973.000 ciclos, inferior à apresentada pelas novas geometrias, Isoladores 2. Esses dados mostram que o conjunto de fixação com as novas geometrias representa um ganho estimado de 10% na vida útil do sistema, fato que reduz o número de paradas da ferrovia. Faz-se necessário salientar que a geometria proposta para o isolador frontal não apresentou danos à estrutura,

rachaduras ou alterações significativas quando submetida a 3.200.000 ciclos, como observado na Figura 11.

Figura 11 – Isolador frontal com geometria 1 após 3.200.000 ciclos



Fonte: acervo dos autores (2025).

No ensaio de rigidez vertical, que consta na Tabela 1, é avaliada a integridade do sistema de fixação após ser submetido ao ensaio de desgaste acelerado; quanto maior a força necessária para erguer o trilho, maior a força de fixação do sistema.

Tabela 1 – Resultados do ensaio de desgaste acelerado

	Isoladores 1	Isoladores 2
Número de ciclos por isolador	973.000	1.068.000
Rigidez vertical (kN/mm)	317	350

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Os valores mostram que o conjunto com a nova geometria (isoladores 2) apresentou uma rigidez de 350 kN/mm, superior à da geometria atual (isoladores 1). Este resultado de rigidez vertical está diretamente ligado ao desempenho do isolador frontal, pois este está em contato com o grampo e com a base do trilho, promovendo isolamento entre as partes metálicas. Como citado anteriormente, os danos por fricção do isolador frontal promovem a perda de massa do mesmo e, com isso, uma "folga" no sistema que diminui a força de ancoragem do grampo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

ISOLADORES FRONTAIS E LATERAIS ATUAIS E POLÍMEROS ALTERNATIVOS

Os materiais poliméricos avaliados – PPS, PPS com 30% de fibra de vidro e POM – para aplicação nos isoladores frontais e laterais, são distintos entre si. Porém, nota-se que, para a escolha de aplicação nos isoladores, é necessário que os polímeros não sofram grande variação nas propriedades exibidas quando sujeitos a intempéries e a calor solar intenso. Então, faz-se necessário um polímero que não sofra grande influência da umidade em sua Tg. Como as solicitações sofridas pelos isoladores frontais são diferentes das dos isoladores laterais, sugere-se considerar a utilização de materiais diferentes em cada um, para que as propriedades necessárias sejam oferecidas em cada caso.

A consideração de novos polímeros para essas peças, juntamente com uma geometria mais eficiente na dissipação da carga cíclica à qual são submetidas, pode trazer benefícios para a durabilidade do conjunto de fixação, maior segurança e impactos financeiros favoráveis.

GEOMETRIA DOS ISOLADORES FRONTAIS E LATERAIS

O desgaste dos isoladores, promovido pelo movimento das composições férreas, não pode ser evitado. Logo, o objetivo das mudanças na sua geometria é aumentar sua vida útil sem que outros elementos sejam prejudicados. Os estudos realizados até o momento mostram alternativas para aprimorar as geometrias dos isoladores e, assim, reduzir o número de paradas de manutenção.

As observações provenientes da ferrovia e os dados das simulações computacionais permitiram chegar a possíveis mudanças na geometria dos isoladores. As simulações mostraram que, dependendo da geometria dos isoladores laterais, as cargas incidentes sobre eles se concentram na superfície de contato com o trilho e são dissipadas pela sua base inferior. Uma distribuição dessas cargas, promovida pelas mudanças de geometria, possibilita maior estabilidade estrutural e menor dano à face de contato do isolador com o trilho.

REFERÊNCIAS

AGICO. **Railway Fastening Systems** – Product Catalog. Anyang General International Co., China, 2019.

AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION (AREMA). **Chapter 30**. *In*: AREMA. Evaluative Tests for Tie Systems. Lanham: AREMA, 2016.

ARIF, M. F.; MERAGHNI, F.; CHEMISKY, Y.; DESPRINGRE, N.; ROBERT, G. In situ damage mechanisms investigation of PA66/GF30 composite: Effect of relative humidity. **Composites Part B: Engineering**, [*s. l.*], v. 58, p. 487-495, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.11.001. Acesso em: 12 fev. 2026.

BROUDIN, M. LE GAC, P. Y.; LE SAUX, V.; CHAMPY, C.; ROBERT, G.; P. CHARRIER; MARCO, Y. Water diffusivity in PA66: Experimental characterization and modeling based on free volume theory. **European Polymer Journal**, [*s. l.*], v. 67, p. 326-334, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.04.015. Acesso em: 19 fev. 2026.

CARRASCAL, I. A.; CASADO, J. A.; DIEGO, S.; POLANCO, J. A. Dynamic behaviour of high-speed rail fastenings in the presence of desert sand. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 117, p. 220-228, 2016, Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.023. Acesso em: 12 fev. 2026.

CHAICHANAWONG, J.; THONGCHUEA, C.; AREERAT, S. Effect of moisture on the mechanical properties of glass fiber reinforced polyamide composites. **Advanced Powder Technology**, [*s. l.*], v. 27, n. 3, p. 898-902, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.02.006. Acesso em: 12 fev. 2026.

CHEN, Z.; LI, T.; YANG, Y.; LIU, X.; LV, R. Mechanical and tribological properties of PA/PPS blends. **Wear**, [*s. l.*], v. 257, n. 7-8, p. 696-707, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.013. Acesso em: 19 fev. 2026.

EFTEKHARI, M.; FATEMI, A. Tensile behavior of thermoplastic composites including temperature, moisture, and hygrothermal effects. **Polymer Testing**, [*s. l.*], v. 51, p. 151-164, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.03.011. Acesso em: 12 fev. 2026.

GONÇALVES, V. P. D.; RANGEL, T. P.; WOLF, E. H. S.; BRITO, F. C.; DIAS, E. C. L. C. M. Eficácia da absorção de impacto do Protetor Bucal na proteção de estruturas: Uma revisão sistemática dos Estudos de Elementos Finitos. **Research, Society and Development**, [*s. l.*], v. 11, n. 2, e51611226005, 2022.

GUAN, Q.; ZHANG, D.; WANG, P.; WEN, Z.; JIN, X., 2019. Influence of Pad Support Length on the Vibration of Wheel-track. **Jixie Gongcheng Xuebao/Journal Mech. Eng.**, [*s. l.*], v. 55, n. 16, p. 159-169, 2019.

HE, J.; WANG, Q.; YAO, B.; HO, J. Mechanical properties of high strength POM-FRCC and its performance under elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 290, p. 123177, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123177. Acesso em: 19 fev. 2026.

Holder, D. E.; Csenge, M. V.; Qian, Y.; Dersch, M. S.; Edwards, J. R.; Van Dyk, B. J. Laboratory investigation of the Skl-style fastening system's lateral load performance under heavy haul freight railroad loads. **Engineering Structures**, [*s. l.*], v. 139, p. 71-80, 2017, Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.039. Acesso em: 12 fev. 2026.

Liu, Y.; YIN, H. P.; Luo, Y.; ZHANG, J. Finite element analysis and experimental investigation of nonlinear features of rail fastening systems. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, [*s. l.*], v. 232, n. 3, p. 873-894, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1177/0954409717701779. Acesso em: 12 fev. 2026.

LORANDI, N. P.; CIOFFI, M. O. H.; ORNAGHI JR., H. Dynamic Mechanical Analysis (DMA) of Polymeric Composite Materials. **Scientia Cum Industria (Sci. Cum Ind.)**, [*s. l.*], v. 4, n. 13, p. 48-60, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.18226/23185279.v4iss1p48. Acesso em: 12 fev. 2026.

MALPOT, A.; TOUCHARD, F.; BERGAMO, S. Effect of relative humidity on mechanical properties of a woven thermoplastic composite for automotive application. **Polymer Testing**, [*s. l.*], v. 48, p. 160-168, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.10.010. Acesso em: 12 fev. 2026.

MCKEEN, L. W. **Fatigue and tribological properties of plastics and elastomers.** Oxford: William Andrew, 2010.

OSHIMA, S.; HIGUCHI, R.; KATO, M.; MINAKUCHI, S.; YOKOZEKI, T.; AOKI, T. Experimental data for cooling rate-dependent properties of Polyphenylene Sulfide (PPS) and Carbon Fiber Reinforced PPS (CF/PPS). **Data in Brief**, [*s. l.*], v. 46, p. 108817, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108817. Acesso em: 12 fev. 2026.

OSSWALD, T. A.; TURNG, L. S.; GRAMANN, P. J. (ed.). **Injection molding Handbook**. 2. ed. Ohio: Hanser, 2008.

PANDROL. Sistema RE. **Pandrol**, 2019. Disponível em: https://www.pandrol.com/pt-br/product/sistema-re/. Acesso em: 12 fev. 2026.

PUTTONEN, T.; SALMI, M.; PARTANEN, J. Mechanical properties and fracture characterization of additive manufacturing polyamide 12 after accelerated weathering. Aalto University School of Engineering, Department of Mechanical Engineering. **Polymer Testing**, [*s. l.*], v. 104, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107376. Acesso em: 19 fev. 2026.

QUAN, D.; LIU, J.; YAO, L.; DRANSFELD, C.; ALDERLIESTEN, R.; ZHAO, G. Interlaminar and intralaminar fracture resistance of recycled carbon fibre/PPS composites with tailored fibre/matrix adhesion. **Composites Science and Technology**, [*s. l.*], v. 239, p. 110051, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2023.110051. Acesso em: 12 fev. 2026.

RÉMOND, Y.; VÉDRINES, M. Measurement of local elastic properties of injection moulded polymer structures by analysis of flexural resonant frequencies. Applications in POM, PA66, filled PA 66. **Polymer Testing**, [*s. l.*], v. 23, n. 3, p. 267-274, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2003.08.005. Acesso em: 19 fev. 2026.

RHODES, D. Fixação de trilhos para aplicações de transporte de cargas pesadas. **Pandrol**, 2021. Disponível em: https://www.pandrol.com/pt-br/insight/fixacao-de-trilhos-para-aplicacoes-de-transporte-de-cargas-pesadas/. Acesso em: 19 fev. 2026.

SADEGHI, J.; SEYEDKAZEMI, M.; KHAJEHDEZFULY, A. 2020. Nonlinear simulation of vertical behavior of railway fastening system. **Engineering Structures**, [*s. l.*], v. 209, p. 110340, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110340. Acesso em: 12 fev. 2026.

SAYER, S. Mechanical performance of polyamid 66 and influence of glass fiber content on moisture absorption. **Materials Testing**, [*s. l.*], v. 56, n. 4, p. 325-330, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.3139/120.110563. Acesso em: 19 fev. 2026.

SHURPALI, A. A.; EDWARDS, J. R.; KERNES, R. G.; LANGE, D. A.; BARKAN, C. P. L. Investigation of material improvements to mitigate the effects of the abrasion mechanism of concrete crosstie rail seat deterioration. **Journal of Transportation Engineering**, [*s. l.*], v. 140, n. 2, p. 1-15, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000616. Acesso em: 19 fev. 2026.

SLadkowski A.; Bizoń, K. Aspects of Rail Infrastructure Design. *In*: MARINOV, M. (ed.). **Sustainable Rail Transport**: Proceedings of RailNewcastle Talks 2016. Newcastle upon Tyne: Springer, 2018.

SOUZA, L. M. de. **Avaliação das propriedades físico-químicas das blendas de poliamida 6 e 66 com fibrina reforçadas com nanotubos de carbono**. 2018. 100 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

SUKUMARAN, J.; PAUW, J. D.; NEIS, P. D.; TÓTH, L. F.; BAETS, P. D. Revisiting polymer tribology for heavy duty application. **Wear**, [*s. l.*], v. 376-377, p. 1321-1332, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.018. Acesso em: 12 fev. 2026.

VOSSLOH. **Vossloh Fastening Systems**. Catálogo técnico. Werdohl: Vossloh Fastening Systems GmbH, 2019. Disponível em: https://media.vossloh.com/media/download/vossloh_fastening_systems/Vossloh_Fastening_Systems_EN.pdf. Acesso em: 19 fev. 2026.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de engenharia**. São Paulo: Artliber, 2005.

Williams, B. A.; Holder, D.; Edwards, J. R.; Dersch, M. S.; Barkan, C. P. L. Quantification of the lateral forces in concrete sleeper fastening systems. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, [*s. l.*], v. 230, n. 7, p. 1714-1721, 2016, Disponível em: https://doi.org/10.1177/0954409715616997. Acesso em: 12 fev. 2026.

XU, J.; WANG, K.; LIANG, X.; GAO, Y.; LIU, Z.; CHEN, R.; WANG, P.; XU, F.; WEI, K. Influence of viscoelastic mechanical properties of rail pads on wheel and corrugated rail rolling contact at high speeds. **Tribology International**, [*s. l.*], v. 151, p. 106523, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106523. Acesso em: 12 fev. 2026.

Yang, F.; Gao, M.; Cong, J.; Wang, P. System dynamics modeling and experimental study of railway track with thermoelectric heater/generator in extreme weather conditions. **Journal of Cleaner Production**. [*s. l.*], v. 249, p. 106523, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119367. Acesso em: 12 fev. 2026.

ZHANG, L.; QI, H.; LI, G.; ZHANG, G.; WANG, T.; WANG, Q. Impact of reinforcing fillers' properties on transfer film structure and tribological performance of POM-based materials. **Tribology International**, [*s. l.*], v. 109, n. nov. 2016, p. 58-68, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.12.005. Acesso em: 20 fev. 2026.

Zhang, X.; C. Zhao, X. Ren, Y. Feng, C. Shi, and W. Zhai. Experimental investigation on the characteristics of the dynamic rail pad force and its stress distribution in the time and frequency domain. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, [*s. l.*], v. 234, n. 2, p. 201-213, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1177/0954409719838116. Acesso em: 12 fev. 2026.

Zhang, Z.; Wei, S.; ANDRAWES, B.; Kuchma, D. A.; EDWARDS, J. R. Numerical and experimental study on dynamic behavior of concrete sleeper track caused by wheel flat. **International Journal of Rail Transportation**, [*s. l.*], v. 4, n. 1, p. 1-19, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1080/23248378.2015.1123657. Acesso em: 12 fev. 2026.



3

Cátia Dulcinéia Francisco Klein
Carlos Leonardo Pandolfo Carone
Vanusca Dalosto Jahno

PALMILHAS AMORTECEDORAS, OU *RAILPADS*

INTRODUÇÃO

As palmilhas amortecedoras, ou *railpads,* fazem parte do sistema de fixação elástico, que é composto por dois grampos elásticos, duas ombreiras e uma palmilha polimérica. Esse sistema foi desenvolvido pela Pandrol S.A. e permitiu que as manutenções de linha ocorressem de forma mais rápida e com menos custos (Pandrol, 2024; Macedo, 2020).

As palmilhas (*railpads)* são confeccionadas com materiais resilientes, que são colocados entre o trilho e o dormente, e desempenham um papel fundamental no comportamento dinâmico dos trilhos, reduzindo a deterioração e o ruído do rolamento (Oregui *et al.,* 2016; Oregui *et al*., 2017).

Figura 1 – Imagens de palmilhas *(railpads)*



Fonte: catálogo Getzner (2022).

Além da função de atenuar as cargas oriundas dos trens, as palmilhas também possuem a função de proteger o dormente de concreto do contato abrasivo com o trilho, a fim de evitar o seu desgaste

(Hansan, 2019). Portanto, devido à necessidade dessas duas propriedades, resiliência e resistência à abrasão, as palmilhas são tradicionalmente confeccionadas em material polimérico (Carmo *et al.*, 2014).

A baixa vida útil das palmilhas gera a necessidade de maior frequência de troca das mesmas, bem como dos dormentes, que, devido ao atrito do trilho com os dormentes, provoca abrasão, aumentando custos e gerando menor disponibilidade da via (Xu *et al.*, 2020).

Em relação aos materiais usados na confecção de palmilhas, o Etileno Acetato de Vinila (EVA) foi um dos primeiros polímeros a ser usado em larga escala; entretanto, devido à sua baixa resistência à abrasão, esse material foi gradualmente substituído por outros polímeros (Dean; Harrison, 1982).

Os autores Remennikov e Kaewunruen (2008) estudaram a redução do impacto em trilhos de concreto na Austrália, utilizando palmilhas de Polietileno de Alta Densidade (High-Density Polyethylene - HPDE). Os experimentos apontaram uma redução de 50% da tensão sobre o dormente com o uso desse tipo de palmilha. Os tipos de palmilha mais empregados nas ferrovias de cargas pesadas são opções de materiais, normalmente elastômeros, e de fabricantes tais como a *Getzner*, com a palmilha *Sylodyn®*, que aumenta a elasticidade da superestrutura ferroviária, com alta capacidade de carga mecânica e excelente desempenho em longos períodos (Getzner, 2023).

O fabricante *Trackelast* fornece palmilhas para uso em dormentes, que podem ser fabricadas em diversos materiais, como FC20 (policloropreno/cortiça), para dormente de madeira; FC9 (borracha/cortiça), para dormentes até 25 toneladas/eixo; FC105A (borracha termoplástica poliéster/cortiça granulada), para dormentes até 25 ton/eixo; e FC584 (borracha sólida/cortiça), para dormentes até 25 ton/eixo (Trackelast FC20, 2022; Trackelast FC9, 2022; Trackelast FC105A, 2022; Trackelast FC584, 2022).

O Brasil tem utilizado diferentes polímeros para esta aplicação: a Ferrovia Centro-Atlântica (FCA) utiliza a palmilha de PA 6; a

Ferrovia Norte-Sul (FNS) foi construída utilizando a palmilha de PEAD (Macedo, 2020); e a Vale S.A. utiliza o TPU na sua Estrada de Ferro Carajás (EFC).

Cada país possui sua particularidade, seja em relação às cargas transportadas, às características ou aos tipos de materiais utilizados na superestrutura ferroviária. Por isso, hoje existe uma grande variedade de materiais utilizados na confecção das palmilhas (*rail-pads)* (Macedo, 2020).

Diversos trabalhos abordam a temática da importância e da caracterização da rigidez estática e dinâmica das palmilhas para diferentes tipos de materiais e aplicações (Zhang *et al*., 2020; Tang *et al*., 2024). Testes de envelhecimento e de fadiga indicam um aumento na rigidez quando há um aumento no número de ciclos. O teste do martelo é comumente usado para derivar os parâmetros de rigidez e amortecimento, nos quais as palmilhas são pré-carregadas com força de fixação, e uma carga é aplicada com variações de frequência (Carrasacal *et al*., 2016).

O uso de simulações por elementos finitos e instrumentação nos trilhos tem sido utilizado em estudos para avaliar a influência da rigidez das palmilhas sobre o fator de impacto dinâmico na ferrovia (Khajehdezfuly, 2019). O estudo realizado por Xu *et al.* (2020) avaliou a influência das propriedades viscoelásticas das palmilhas de borracha no comportamento do contato roda vs. trilho, utilizando o MEF (Método de Elementos Finitos), um modelo numérico para tratar os dados obtidos do experimento.

ELASTÔMEROS

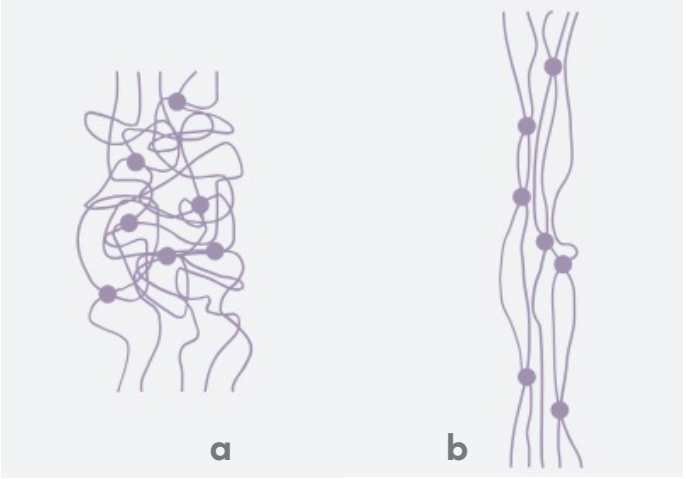
Elastômeros são uma classe de polímeros lineares que exibem a capacidade de se recuperar após elevadas deformações, de

maneira rápida e eficiente, quando submetidos a uma força aplicada (Salvi, 2021). Muitos desses polímeros apresentam alongamento de até 1500%. Após a liberação da carga aplicada, a deformação elástica é completamente recuperada, e o material retorna ao seu comprimento inicial, isento de quaisquer mudanças estruturais (Callister Jr.; Rethwisch, 2015).

Os elastômeros podem ser utilizados em aplicações industriais, como automóveis, construção civil, tecidos de revestimento, encapsulamento elétrico, engenharia de componentes, mineração, utensílios utilizados para armazenar grãos, vedações, gaxetas, calçados, rodas e pneus, dentre outras aplicações na engenharia de materiais (Gonzaga Neto, 2021).

Os elastômeros com ligações cruzadas fracas geralmente têm um baixo módulo de elasticidade e alta extensibilidade, em comparação com outros materiais. As cadeias dos elastômeros são mantidas juntas por ligações intermoleculares relativamente fracas, que permitem que os polímeros se estiquem sob tensão. Os elastômeros devem sua elasticidade à capacidade das moléculas de cadeia longa de se realinharem para distribuir uma tensão aplicada. Em condições normais, as longas moléculas do material elastomérico são enroladas de forma irregular e, quando uma força é aplicada, elas se alinham na direção desse esforço, conforme a Figura 2, retornando à sua disposição normal quando a força ou a tensão é liberada. Devido a essa extrema flexibilidade, os elastômeros podem expandir-se reversivelmente em até várias centenas de por cento (Conrad, 2022).

Figura 2 - Elastômero sem tensão (a) e sob tensão (b)



Fonte: Conrad (2022).

Os elastômeros podem ser divididos em dois grupos: elastômeros termofixos e termoplásticos, e diferem muito em suas propriedades e formas de processamento.

ELASTÔMEROS TERMOFIXOS

Os elastômeros termofixos não podem ser remoldados após o processo de cura; a razão para isso é que os termofixos possuem uma estrutura de rede firmemente reticulada em três dimensões por ligações químicas induzidas pelo calor e pelo uso de vulcanizantes e reticulantes (Conrad, 2022).

Enquanto os elastômeros insaturados são vulcanizados com enxofre, os elastômeros saturados são curados por outros agentes de reticulação. A etapa de "cura" pode ser realizada por meio de aquecimento ou pela adição de catalisadores, em geral com a aplicação de pressão. Durante a "cura" ocorrem mudanças químicas e

estruturais em escala molecular, com formação de ligações cruzadas ou reticuladas. Os polímeros termofixos são dificilmente recicláveis, não são fusíveis e podem ser usados em temperaturas maiores do que as temperaturas de utilização dos termoplásticos (Callister, 2015).

ELASTÔMEROS TERMOPLÁSTICOS

Os elastômeros termoplásticos (TPEs) representam uma nova classe de polímeros que apresentam propriedades semelhantes às dos elastômeros convencionais (borrachas), porém podem ser processados por extrusão, injeção, entre outros métodos, eliminando a necessidade de métodos demorados de processamento de borracha, como a vulcanização (Conrad, 2002; Oliveira, 2023).

As propriedades únicas dos TPEs são obtidas por meio de sua estrutura bifásica, que consiste em uma fase flexível composta por um elastômero, que confere propriedades elastoméricas no estado sólido, e uma fase rígida, constituída por um termoplástico com alta temperatura de transição vítrea, que confere resistência mecânica. Durante o uso, a fase rígida atua como ponto de reticulação física para a fase do elastômero, enquanto, em temperaturas acima da temperatura de transição vítrea ou da temperatura de fusão, a fase rígida amolece, tornando os TPEs processáveis (Oliveira, 2023).

Dentre os elastômeros (borrachas) utilizados como palmilhas amortecedoras, pode-se citar as borrachas que apresentam ligações insaturadas, como: a borracha natural (NR), policloropreno (CR), poliisopreno (IR), butadieno estireno (SBR), etileno propileno dieno (EPDM) etc., que apresentam ligações insaturadas e que, quando vulcanizadas, apresentam aumento das propriedades mecânicas, como abrasão, deformação permanente, resistência ao tracionamento e resistência ao calor (Silva, 2021).

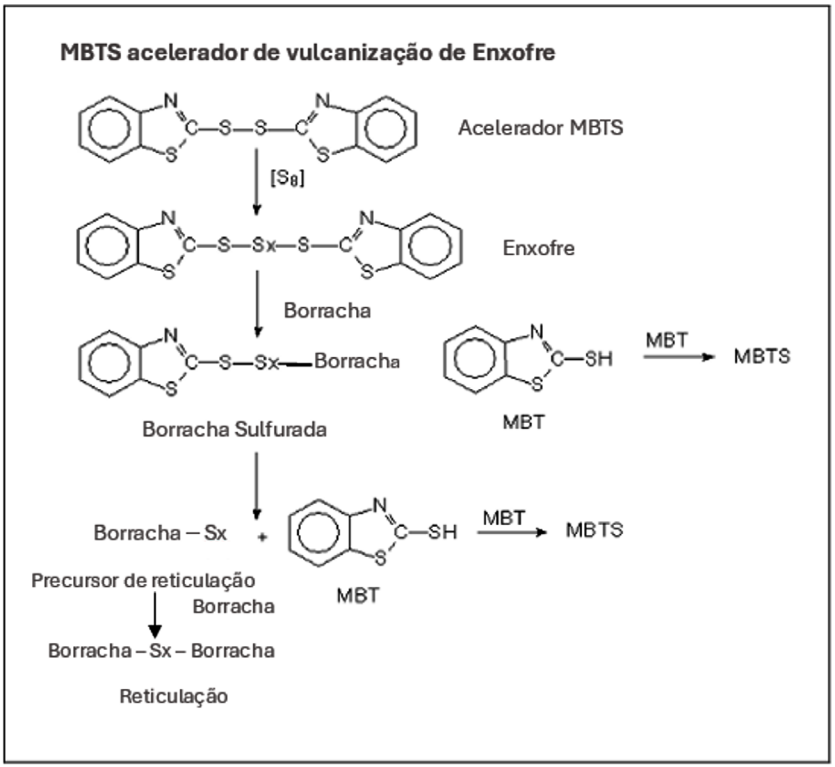
VULCANIZAÇÃO

A vulcanização é uma etapa fundamental do processamento, pois é nela que o elastômero desenvolve suas propriedades finais; o polímero reage com componentes específicos para produzir uma rede de ligações cruzadas. Essas ligações podem ser constituídas por átomos de enxofre ou podem ter alguma outra composição química, dependendo do agente de reticulação (Nocil, 2014).

Dentre os componentes que atuam na vulcanização dos elastômeros destacam-se o enxofre, os aceleradores, o ácido esteárico e o óxido de zinco (ZnO). O ZnO é adicionado aos compostos elastoméricos para tornar o acelerador ativo e, assim, reduzir o tempo de vulcanização (Gonzaga Neto, 2021).

No decorrer do processo de vulcanização, além do enxofre, são incorporados agentes aceleradores e ativadores, que têm como objetivo aperfeiçoar o processo, conforme ilustrado na Figura 3. Os ativadores mais utilizados são os óxidos metálicos, como o óxido de zinco e o óxido de magnésio, combinados com a estearina, formando o estearato de zinco (Veiga, 2019; Vishnu; Prabu; Pugazhvadivu, 2023).

Figura 3 - Processo de vulcanização usando MBTS como acelerador



Fonte: Nocil (2014).

Aumentando a concentração de enxofre e de acelerador, a densidade de ligações cruzadas aumenta e, portanto, aumentam o módulo, a dureza, entre outras propriedades dos artefatos finais vulcanizados obtidos (Coran, 1994; Schuster, 2021).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As palmilhas amortecedoras (*railpads*) desempenham um papel essencial na integridade estrutural e operacional dos sistemas ferroviários, especialmente frente às crescentes demandas por desempenho, durabilidade e segurança. A evolução no design e nos materiais utilizados, com destaque para os elastômeros termoplásticos e termofixos, tem proporcionado maior resistência à abrasão, resiliência mecânica e eficiência no amortecimento dinâmico.

A seleção adequada do material é estratégica e deve considerar fatores como carga por eixo, tipo de dormente, condições climáticas e disponibilidade de recursos.

REFERÊNCIAS

CALLISTER Jr., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma Introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CARMO, T. B. DO; EDWARDS, J. R.; KERNES, R. G.; BARKAN, C. P. L.; ANDRAWES, B. O. Mechanistic Behavior of Concrete Crosstie Fastening System Rail Pad Assemblies. **Proceedings of the Transportation Research Board 93rd Annual Meeting**, [*s. l.*], 2014.

CARRASCAL, I.A.; CASADO, J. A.; DIEGO, S.; POLANCO, J. A. Dynamic behavior high-speed rail fastenings in the presence of desert sand. **Construction And Building Materials**, [*s. l.*], v. 117, p. 220-228, 2016.

CONRAD, R. O que são elastômeros? **Kuraray**, 2022. Disponível em: https://www.elastomer.kuraray.com/pt/blog/what-are-elastomers/. Acesso em: 19 fev. 2026.

CORAN, A. Y. Vulcanization. In: EIRICH, F. R.; ERMAN, B. **The *Science* and *Technology* of *Rubber***. New York: Academic Press, 1994.

DEAN, F. E.; HARRINSON, H. D. **Laboratory study to determine the effects of tie pad stiffness on the attenuation of impact strain in concrete ties.** Contract no. DOT-FR-9162, US Dept of Transportation, Washington, DC, 1982.

GETZNER. Sylodyn® by getzner. **Getzner**, 2023. Disponível em: https://www.getzner.com/en/products/sylodyn. Acesso em: 19 fev. 2026.

GONZAGA NETO, A. C. **Avaliação do mecanismo de vulcanização de compostos de EPDM com e sem adição de nanopartículas de óxido de grafeno**. 2021. 136 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, 2021.

HASAN, N. Rail Pad Stiffness and Classification System. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, [*s. l.*], v. 145, n. 5, 2019.

KHAJEHDEZFULY, A. Effect of rail pad stiffness on the wheel/rail force intensity in a railway slab track with short-wave irregularity. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, [*s. l.*], v. 233, n. 10, p. 1038-1049, 2019.

MACEDO, P. D. F. **Caracterização de palmilhas para trilho confeccionadas nos polímeros poliamida 6 e polietileno de alta densidade**: um estudo comparativo. 2020. Dissertação (Mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

NOCIL. Vulcanization & Accelerators. **NOCIL Limited**, 2014.

OLIVEIRA, R. M. V. **Blendas de poli (fluoreto de vinilideno) (PVDF) com poliuretano termoplástico (TPU) com fase reticulada preparadas por solução**. 2023. 56 f. Trabalho de conclusão de curso de graduação (Bacharelado em Energia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2023.

OREGUI, M.; MAN, A. de; WOLDEKIDAN, M. F.; LI, Z.; DOLLEVOET, R. Obtaining railpad properties via dynamic mechanical analysis. **Journal of Sound and Vibration,** [*s. l.*], v. 363, p. 460-472, 2016.

OREGUI, M.; NÚNEZ, A.; DOLLEVOET, R.; LI, Z. Sensitivity Analysis of Railpad Parameters on Vertical Railway Track Dynamic. **Journal of Engineering Mechanics**, [*s. l.*], v. 143, n. 5, 2017.

PANDROL. **Track Systems. Rail fastenings for heavy haul applications**. Catálogo do fabricante, 2024. Disponível em: http://www.pandrol.com/product/e-clip. Acesso em: 13 out. 2022.

REMENNIKOV, A. M.; KAEWUNRUEN, S. A review of loading conditions for railway track structures due to train and track vertical interaction. **Structural Control and Health Monitoring,** v. 15, n. 2, p. 207-234, 2008.

SALVI, D. W. **Caracterização dos mecanismos de envelhecimento de elastômeros para aplicação em pneus rodoviários e Urbanos.** 2021. 143 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Aplicadas da Universidade Estadual de Campinas, Engenharia de Produção e de Manufatura, Limeira, 2021.

SCHUSTER, R. H. **Dispersão de Cargas e Reforço** - Ciência e Aplicação. 1. ed. Porto Alegre: ABTB/SLTC, 2021.

SILVA, N. M. G. **Caracterização dos Processos de Vulcanização da Cortiça com Borracha.** 2021.122 f. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Ciências Universidade do Porto, Departamento de Química e Bioquímica, Porto, 2021.

TANG, S.; LI, Z.; SUN, W.; LIU, Y.; WANG, J.; WANG, X.; LIN, J. Natural Rubber/Styrene–Butadiene Rubber Blend Composites Potentially Applied in Damping Bearings, **Polymers**, [*s. l.*], v. 16, n. 13, p. 1945, 2024. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/polym16131945. Acesso em: 19 fev. 2026.

TRACKELAST. **FC105A.** 2022. Disponível em: http://www.trackelast.com/datasheets/Trackelast-DS-FC105A-Pad.pdf. Acesso em: 10 jul. 2022.

TRACKELAST. **FC20.** 2022. Disponível em: http://www.trackelast.com/datasheets/Trackelast-DS-FC20-Rail-Pad.pdf. Acesso em: 10 jul. 2022.

TRACKELAST. **FC584.** 2022. Disponível em: http://www.trackelast.com/datasheets/Trackelast-DS-FC584-Rail-Pad.pdf. Acesso em: 10 jul. 2022.

TRACKELAST. **FC9.** 2022. Disponível em: http://www.trackelast.com/datasheets/Trackelast-DS-FC9-Rail-Pad.pdf. Acesso em: 10 jul. 2022.

VEIGA, V. D. A. **Influência do inibidor de pré-vulcanização nas propriedades de Composições de borracha natural não vulcanizadas.** 2019. 96 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2019.

VISHNU, S.; PRABU, B.; PUGAZHVADIVU, M.; Strategies to improve the mechanical performance of elastomers using ternary blends: A review. **Hybrid Advances**, [*s. l.*], v. 3, p. 100062, 2023.

XU, J.; WANG, K.; LIANG, X.; GAO, Y.; LIU, Z.; CHEN, R.; WANG, P.; XU, F.; WEI, K. Influence of viscoelastic mechanical properties of rail pads on wheel and corrugated rail rolling contact at high speeds. **Tribology International**, [*s. l.*], v. 151, 2020.

ZHANG, X.; C. ZHAO, X. REN, Y. FENG, C. SHI, AND W. ZHAI. Experimental investigation on the characteristics of the dynamic rail pad force and its stress distribution in the time and frequency domain. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F:** Journal of Rail and Rapid Transit, [*s. l.*], v. 234, n. 2, p. 201-213, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1177/0954409719838116. Acesso em: 19 fev. 2026.

ZHANG, Z.; JIA, X.; WANG, Y. Effect of vulcanization on the tribological behavior and sealing performance of EPDM seals: Experimentation and simulation. **Tribology International,** [*s. l.*], v. 164, 2021.

SOBRE OS AUTORES E AS AUTORAS

Carlos Leonardo Pandolfo Carone

Doutor em Ciências dos Materiais. Docente do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais da Universidade Feevale.

E-mail: carloscarone@feevale.br

Cátia Dulcinéia Francisco Klein

Doutora em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais. Egressa do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais da Universidade Feevale.

E-mail: 0128347@feevale.br

Cheila Viegas

Doutora em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais. Egressa do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais da Universidade Feevale.

E-mail: viegascheila@gmail.com

Fernando Dal Pont Morisso

Doutor em Química. Docente do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais da Universidade Feevale.

E-mail: morisso@feevale.br

Francieli Albani

Doutora em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais. Egressa do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais da Universidade Feevale.

E-mail: francielialbani.fa@gmail.com

Luana Graziela Adam

Doutora em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais. Egressa do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais da Universidade Feevale.

E-mail: luana.adam@gmail.com

Marco Antônio Siqueira Rodrigues

Doutor em Engenharia de Materiais. Docente do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais da Universidade Feevale.

E-mail: marcor@feevale.br

Vanusca Dalosto Jahno

Doutora em Medicina e Ciências da Saúde. Docente do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais da Universidade Feevale. Coordenadora do Projeto "Desenvolvimento de Fixações Ferroviárias em Polímero" pela Cátedra Under Rail da Vale S.A. com a Universidade Feevale (Novo Hamburgo – RS, Brasil).

E-mail: vanusca@feevale.br



www.pimentacultural.com

O e-book aborda os sistemas de fixação ferroviária e a importância dos polímeros na integridade das linhas, apresentando metodologias de caracterização como espectroscopia, calorimetria, microscopia e ensaios mecânicos. Também faz uma análise da degradação dos materiais frente a esforços cíclicos, variações térmicas e exposição ambiental. Assim, integra teoria e prática para apoiar engenheiros e pesquisadores na escolha de materiais mais duráveis e sustentáveis.

VALE

UNIVERSIDADE FEEVALE

pimenta cultural