

ANTT- Agência Nacional de Transportes Terrestres

RDT – Recurso de Desenvolvimento Tecnológico

PLANO DE TRABALHO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO, TÉRMICO E ESPECIFICAÇÃO
TÉCNICA DE COMPOSIÇÕES ELASTOMÉRICAS USADAS EM SISTEMAS DE
SUSPENSÃO E FREIOS DE MATERIAL RODANTE**

**APRIMORAMENTO DA MANUTENÇÃO FERROVIÁRIA, INCLUSIVE COM A
INTEGRAÇÃO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS E A AUTOMAÇÃO
INDUSTRIAL**

VALE S.A. – Estrada de Ferro Vitória a Minas

05/05/2025

Sumário

1	DESCRIÇÃO DO PROJETO.....	3
1.1.1	Linha de Inovação e Desenvolvimento.....	3
1.1.2	Temas.....	3
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivo Geral.....	3
1.2.2	Objetivos Específicos.....	4
2	JUSTIFICATIVA.....	5
3	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	11
3.1	Métodos e Técnicas utilizadas.....	11
3.2	Etapas.....	19
4	PREVISÃO DE INÍCIO, TEMPO DE EXECUÇÃO E CUSTO TOTAL.....	24
5	LOCAL DE EXECUÇÃO.....	26
6	ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA.....	27
6.1	Identificação da Entidade.....	27
6.2	Identificação da Equipe Executora.....	31
7	PRODUTOS.....	33
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / NORMATIVOS APLICÁVEIS.....	35
9	ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO.....	36

1 DESCRIÇÃO DO PROJETO

1.1 Título do Projeto

Estudo do comportamento mecânico, térmico e especificação técnica de composições elastoméricas usadas em sistemas de suspensão e freios de material rodante.

1.1.1 Linha de Inovação e Desenvolvimento

O presente projeto está alinhado à Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023, em especial ao disposto no Art. 3º, inciso II, ao buscar a melhoria da qualidade dos serviços objeto de concessão ferroviária federal, inclusive relacionada aos atributos de regularidade, continuidade, eficiência, segurança, atualidade, generalidade, cortesia na sua prestação e modicidade das tarifas. Além disso, atende ao disposto no Art. 4º, ao promover a inovação por meio do desenvolvimento de: (I) métodos e técnicas construtivas; (II) tecnologia básica e aplicada; e (III) soluções técnicas para problemas específicos.

1.1.2 Temas

- Otimização de Formulações Elastoméricas para Ambientes Severos.
- Dinâmica e Comportamento Viscoelástico.
- Reaproveitamento e Reciclagem de Elastômeros Pós-Consumo.
- Modelagem Computacional para Aplicações Ferroviárias.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este projeto de Pesquisa e Desenvolvimento tem como objetivo gerar conhecimento aplicado sobre os componentes de borracha utilizados no setor ferroviário, com foco em válvulas do sistema de freios, mangueiras e PADs. Busca-se estabelecer correlações entre o desempenho desses componentes e suas formulações básicas, por meio da análise de diversas propriedades e da aplicação tanto de conhecimento técnico existente quanto do desenvolvimento de novas formulações. Adicionalmente, serão investigados os efeitos das condições ambientais no envelhecimento das composições e na vida útil dos componentes. Além disso, o projeto visa definir parâmetros mínimos de qualidade para os materiais utilizados nessas aplicações específicas e elaborar especificações técnicas para os ensaios de recepção dos componentes.

1.2.2 Objetivos Específicos

O projeto será conduzido com base em objetivos específicos inter-relacionados, que contribuirão para o alcance do objetivo geral. Os objetivos estabelecidos são:

1. Estabelecer especificações técnicas aprimoradas para os ensaios de recepção de materiais elastoméricos utilizados em válvulas de freio, mangueiras e PADs, alinhadas aos requisitos operacionais e normativos do setor ferroviário.
2. Definir parâmetros críticos de desempenho e qualidade para materiais elastoméricos, garantindo sua conformidade com as condições de operação e os padrões regulatórios nacionais e internacionais.
3. Investigar os impactos de variáveis ambientais severas – como temperatura, umidade, radiação e exposição a substâncias químicas – sobre as propriedades mecânicas e a morfologia dos materiais, com o intuito de identificar mecanismos de degradação e propor soluções técnicas.
4. Modelar e simular o comportamento viscoelástico dos sistemas elastoméricos em condições de operação ferroviária, utilizando ferramentas computacionais avançadas para prever o desempenho e otimizar formulações.
5. Promover a troca e disseminação de conhecimento entre pesquisadores da UFPI e profissionais do setor ferroviário, por meio de reuniões técnicas, treinamentos colaborativos e da elaboração de relatórios com os resultados alcançados. Além disso, gerar conhecimento relevante para a academia e empresas ferroviárias brasileiras, formando pós-graduandos em temas inovadores relacionados ao transporte ferroviário, além de incentivar o interesse pela área ferroviária na graduação, por meio da iniciação científica.
6. Fomentar a produção acadêmica, incluindo dissertações de mestrado, teses de doutorado, pesquisas de pós-doutorado e projetos de iniciação científica alinhados aos objetivos deste trabalho. Paralelamente, submeter e publicar os resultados das pesquisas em congressos especializados e revistas científicas e tecnológicas.
7. Expandir os canais de pesquisa e debate sobre sistemas elastoméricos, com foco em aplicações para válvulas de freios, mangueiras e PADs.

8. Incorporar práticas sustentáveis ao desenvolvimento de novos materiais, explorando o uso de componentes biodegradáveis e tecnologias que minimizem impactos ambientais, em alinhamento com as demandas globais por sustentabilidade.
9. Promover a qualificação de recursos humanos e o fortalecimento da infraestrutura científica no setor, contribuindo para o avanço das metas globais por meio dos seguintes Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS):
 - **ODS 9** - Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação.
 - **ODS 10** - Reduzir as desigualdades dentro dos países e entre eles, com foco em capacitação e desenvolvimento regional.
 - **ODS 12** - Garantir padrões de produção e consumo sustentáveis, promovendo o uso eficiente de recursos naturais e a minimização de resíduos.

2 JUSTIFICATIVA

A utilização de materiais elastoméricos em aplicações industriais, especialmente no setor ferroviário, é um marco tecnológico consolidado desde o final do século XIX. Tais materiais possuem características únicas como alta elasticidade, resistência ao impacto e capacidade de suportar ciclos de carga dinâmicos, que os tornam fundamentais em sistemas críticos.

No contexto ferroviário, componentes como válvulas de freio, mangueiras e PAD's desempenham papéis cruciais na segurança e na eficiência operacional. Conforme apontado por Gent (2012), os elastômeros são amplamente utilizados devido à sua resistência ao envelhecimento térmico, abrasão e vibrações mecânicas. No entanto, o ambiente operacional ferroviário impõe condições severas, como variações extremas de temperatura, alta umidade e exposição a substâncias químicas, que aceleram processos de degradação, como oxidação térmica e foto-oxidação, comprometendo a integridade e a durabilidade desses materiais (Rivlin; Thomas, 1953).

A degradação de elastômeros em condições adversas não é apenas um problema técnico, mas também econômico e ambiental. No Brasil, a substituição frequente de componentes devido à degradação representa custos elevados para as concessionárias, além de contribuir para a geração de resíduos poliméricos, cujo descarte inadequado pode causar impactos ambientais de

longo prazo. Pesquisas recentes, como as de Thomas et al. (2021), indicam que a introdução de aditivos sustentáveis, como nanocompósitos e agentes de reticulação ecologicamente amigáveis, pode aumentar significativamente a durabilidade dos elastômeros, reduzindo custos e impactos ambientais (Thomas et al., 2021).

O desenvolvimento de soluções científicas e técnicas para esses desafios também fortalece a integração entre a academia e o setor ferroviário. Parcerias entre universidades e concessionárias não apenas fomentam a formação de recursos humanos qualificados, mas também promovem a produção de conhecimento aplicado. Este projeto, por exemplo, busca compreender os mecanismos de degradação dos elastômeros, propor novas formulações para sistemas ferroviários e disseminar seus resultados por meio de publicações científicas e tecnológicas.

A proposta justifica-se pela necessidade urgente de aprimorar a confiabilidade e a sustentabilidade de materiais elastoméricos no setor ferroviário brasileiro. Ao contribuir para a redução de custos operacionais, o aumento da segurança e o alinhamento com metas globais de sustentabilidade, este projeto reforça o papel da UFPI como uma instituição protagonista na geração de soluções inovadoras para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental do país.

O presente projeto visa também subsidiar a engenharia ferroviária brasileira com conhecimento técnico e científico, permitindo decisões estratégicas relacionadas ao desenvolvimento de materiais elastoméricos mais eficientes, duráveis e sustentáveis. Além de atender às demandas do setor ferroviário, a iniciativa promove uma colaboração significativa entre a UFPI, concessionárias e a sociedade, priorizando soluções adaptadas às condições nacionais.

Soluções comerciais disponíveis para análise e simulação ferroviária apresentam limitações significativas, como dependência de ajustes empíricos e funcionamento interno proprietário, reduzindo sua aplicabilidade às condições específicas do Brasil. Nesse contexto, o desenvolvimento de ferramentas e metodologias próprias, validadas por meio de estudos experimentais, é essencial para alcançar autonomia tecnológica e promover avanços mais adequados às demandas nacionais.

Os benefícios esperados vão além dos avanços técnicos e científicos. Para o setor ferroviário, a iniciativa oferece uma oportunidade de aumentar a eficiência operacional, reduzir custos e melhorar a segurança. Para o país, ferrovias mais produtivas representam maior competitividade no mercado interno e externo, além de um sistema de transporte mais seguro e

sustentável. Para a sociedade, os resultados incluem geração de empregos, maior arrecadação de impostos e fortalecimento da capacidade de inovação.

Portanto, este projeto não apenas atende às demandas práticas do setor ferroviário brasileiro, mas também fortalece o papel estratégico da UFPI como agente de transformação no cenário nacional, contribuindo significativamente para o desenvolvimento técnico, econômico e ambiental do país.

Os resultados previstos para este projeto, assim como os benefícios econômicos associados, justificam de forma substancial sua execução. O desenvolvimento de materiais elastoméricos mais duráveis, eficientes e sustentáveis, voltados para aplicações críticas no setor ferroviário, terá impacto direto na redução de custos operacionais, no aumento da confiabilidade dos sistemas e na mitigação de problemas relacionados ao desgaste prematuro de componentes. Além disso, a criação de metodologias próprias para modelagem e simulação desses materiais em condições extremas permitirá avanços significativos na engenharia ferroviária, ao mesmo tempo que abre novas possibilidades para a pesquisa e inovação tecnológica no Brasil.

No contexto ferroviário nacional, contar com uma base sólida de conhecimento nacional sobre materiais elastoméricos é essencial para atender às necessidades específicas do setor, incluindo: (a) a concepção de componentes mais robustos e adaptados às condições operacionais brasileiras; (b) a definição de novas diretrizes técnicas para a aquisição de materiais; (c) a otimização de processos que priorizem eficiência, segurança e sustentabilidade; e (d) a expansão de soluções tecnológicas que possam ser aplicadas também em outros sistemas de transporte e logística. Tais avanços não apenas reforçarão a autonomia tecnológica do país, mas poderão ainda posicionar a pesquisa nacional como referência em soluções aplicadas ao transporte ferroviário.

Especificamente para o Nordeste, este projeto representa uma oportunidade para alavancar o desenvolvimento tecnológico na região, que historicamente enfrenta desafios econômicos e estruturais. A realização de pesquisas avançadas pela UFPI, aliada à formação de especialistas qualificados, contribuirá para fortalecer a infraestrutura científica local, atraindo investimentos e estimulando a criação de empregos de alto valor agregado. Ao consolidar a região como um dos polos de inovação no Brasil, o projeto também favorecerá a redução das desigualdades regionais, ampliando o acesso a tecnologias e recursos que beneficiam tanto a indústria quanto a sociedade.

Os resultados obtidos poderão ser utilizados para aumentar a eficiência do transporte ferroviário em diferentes regiões do Brasil, sendo que o estudo das propriedades e do desempenho dos materiais elastoméricos permitirá a otimização de processos. O projeto também pretende expandir a capacidade técnica da instituição, integrando novos equipamentos e conhecimentos aos seus laboratórios, promovendo a formação de recursos humanos altamente qualificados e disseminando os resultados para a sociedade de forma ampla e acessível.

Por fim, os impactos positivos também são estendidos à sociedade como um todo. A geração de conhecimento técnico e científico qualifica profissionais e fomenta a inovação, contribuindo para o avanço do setor ferroviário, promovendo mudanças estruturais que impactam positivamente a economia, o meio ambiente e o bem-estar social.

Adequação ao RDT e Integração

A justificativa apresentada destaca a forte relação desta proposta com as diretrizes e objetivos expressos na Resolução nº 6.021, de 2023. O projeto busca aprimorar a qualidade e a segurança dos serviços ferroviários por meio do desenvolvimento de materiais elastoméricos mais eficientes, duráveis e sustentáveis, essenciais para componentes críticos como válvulas de freio, mangueiras e PADs. Essas melhorias estão alinhadas com a diretriz do inciso II, Art. 3º, ao contribuir diretamente para a redução de falhas operacionais e o aumento da confiabilidade, mesmo em condições adversas de operação. Além disso, o projeto está em conformidade com os incisos I, II e III, Art. 4º, ao desenvolver soluções técnicas para desafios específicos enfrentados pelas concessionárias ferroviárias, promovendo maior eficiência no transporte e redução de custos operacionais, a partir da inserção de novos materiais e desenvolvimento de novas formulações elastoméricas que representarão inovação direta nas técnicas construtivas tradicionais, testes laboratoriais em consonância com condições operacionais, incluindo tecnologia básica (entendimento do comportamento dos materiais) e aplicada (emprego prático nos sistemas ferroviários).

Tais iniciativas promovem a redução de resíduos e a otimização do uso de recursos naturais, em conformidade com os objetivos da Resolução. Especificamente, o projeto atende às diretrizes ao:

1. Desenvolver metodologias avançadas para a avaliação do desempenho e da durabilidade de materiais elastoméricos, ampliando o conhecimento técnico sobre esses componentes.

2. Propor soluções que não integram obrigações contratuais da concessionária, mas que ampliam sua capacidade técnica e gerencial.
3. Integrar inovação e sustentabilidade por meio de práticas que posicionam o Brasil como referência em engenharia ferroviária sustentável.

Este estudo inclui uma análise aprofundada das propriedades mecânicas e térmicas dos elastômeros em condições severas, como exposição a altas temperaturas, umidade e substâncias químicas agressivas. A partir dessas análises, serão desenvolvidas novas formulações de elastômeros com maior resistência à degradação e melhores propriedades viscoelásticas, ampliando sua durabilidade e desempenho. Um dos resultados esperados é a geração de conhecimento técnico aplicável às operações ferroviárias, permitindo que as concessionárias tomem decisões informadas sobre a utilização de materiais inovadores em seus sistemas. Além disso, será elaborado um programa computacional específico para avaliar o comportamento desses materiais em simulações de operação ferroviária, o que poderá ser expandido para futuras aplicações e registrado como software.

O presente projeto, foi elaborado em consonância com o disposto no inciso I, do artigo 8º, da Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023, não se destinando ao cumprimento das obrigações contratuais regulares atribuídas à concessionária. O objetivo primordial reside no desenvolvimento e implementação de estudos, bem como de soluções tecnológicas e/ou inovadoras, direcionadas para atender às demandas do setor ferroviário, proporcionando, assim, suporte técnico e científico que favoreça o aprimoramento do posicionamento estratégico e competitivo do setor logístico ferroviário. Além disso, busca-se agregar valor à comunidade e à gestão pública vinculada ao setor, por meio de iniciativas inovadoras e proativas, com foco na modernização e na sustentabilidade das ferrovias. Sendo assim, o projeto visa contribuir, de maneira efetiva, para o progresso e a evolução contínua do sistema ferroviário, alinhando-se aos melhores interesses do setor e da sociedade como um todo.

Além da UFPI, outras instituições de ensino e pesquisa no Brasil têm contribuído significativamente com projetos relacionados à inovação no setor ferroviário, apoiados pela VALE e demais concessionárias. Exemplos incluem iniciativas voltadas à dinâmica de veículos ferroviários, manutenção preditiva e desenvolvimento de ferrovias inteligentes. A integração do projeto da UFPI com essas iniciativas amplia o impacto das pesquisas, fortalecendo o

ecossistema de inovação e promovendo sinergias entre instituições líderes na área, com protagonismo inédito de uma instituição da Região Nordeste.

Participação em Eventos Técnicos e Científicos

A participação em eventos científicos e técnicos desempenha um papel essencial no sucesso deste projeto, proporcionando não apenas a divulgação dos resultados, mas também a troca de experiências entre pesquisadores, a imersão nas discussões mais recentes da área e o fortalecimento das redes de colaboração científica. Esses eventos oferecem um ambiente propício para debates com especialistas, aprendizado sobre novas tecnologias e metodologias, além da oportunidade de estabelecer parcerias estratégicas com instituições de referência nacional e internacional.

A interação com pesquisadores de diversas instituições e setores da indústria ferroviária e de materiais poliméricos permitirá à equipe do projeto aprofundar conhecimentos, identificar desafios emergentes e alinhar suas pesquisas às tendências globais do setor. Além disso, a participação ativa nesses congressos garante a inserção do projeto no contexto da inovação tecnológica, promovendo a validação científica e a disseminação dos avanços alcançados. Dentre os eventos estratégicos para a disseminação dos resultados e o fortalecimento da colaboração científica, destacam-se:

- CBECIMAT (Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais)
 - *Página oficial:* <https://www.cbecimat.com.br/>
 - Público médio estimado: 1000 a 1300 participantes
 - Congresso que reúne pesquisadores, estudantes e profissionais da indústria para discutir os avanços na ciência e engenharia dos materiais. A participação neste evento ampliará a visibilidade do projeto dentro da comunidade científica, permitindo a troca de experiências e o estabelecimento de novas parcerias com especialistas em materiais poliméricos e engenharia ferroviária.
- CILAMCE (Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering)
 - *Página oficial:* <https://cilamce.com.br/>
 - Público médio estimado: 500 a 700 participantes

- Evento internacional de grande relevância na área de modelagem computacional aplicada à engenharia. A presença da equipe garantirá o compartilhamento de metodologias inovadoras para a simulação do comportamento viscoelástico dos elastômeros em aplicações ferroviárias, além da oportunidade de aprimorar as ferramentas computacionais desenvolvidas no projeto por meio do intercâmbio com especialistas em simulação numérica.
- COBEM (Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica)
 - *Página oficial:* <https://eventos.abcm.org.br/cobem2025/>
 - Público médio estimado: 1200 a 1500 participantes
 - Um dos maiores eventos da engenharia mecânica no Brasil, abrangendo temas como dinâmica de sistemas, materiais avançados e sustentabilidade. A participação proporcionará imersão nas discussões mais atuais sobre inovação em engenharia mecânica e suas aplicações no setor ferroviário, fortalecendo o impacto do projeto por meio do compartilhamento de resultados e do diálogo com profissionais da área.
- CBPOL (Congresso Brasileiro de Polímeros)
 - *Página oficial:* <https://www.cbpol.com.br/>
 - Público médio estimado: 800 a 1000 participantes
 - Evento de referência nacional no estudo de polímeros, reunindo pesquisadores acadêmicos e representantes da indústria. A participação permitirá não apenas a apresentação dos avanços na formulação de elastômeros e tecnologias sustentáveis, mas também o contato direto com especialistas da área, possibilitando colaborações para futuras pesquisas.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

3.1 Métodos e Técnicas utilizadas

O desenvolvimento deste projeto será baseado em abordagens experimentais e computacionais, estruturadas em quatro eixos principais: levantamento bibliográfico, caracterização de materiais, formulação de novos compostos e modelagem computacional.

Revisão Bibliográfica: Será realizada análise detalhada da literatura técnica e científica, incluindo artigos, patentes e normas nacionais e internacionais. Etapa contínua ao longo do

projeto, embasando a elaboração de novas abordagens, a interpretação de resultados e a redação de publicações científicas e relatórios técnicos.

Caracterização de Materiais: Técnicas avançadas serão empregadas para a análise das propriedades químicas, físicas e mecânicas das amostras virgens e pós-consumo. Dentre os métodos a serem utilizados, destacam-se:

- **Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR):** Identificação de grupos funcionais e análise da composição química dos materiais.
- **Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV):** Estudo morfológico detalhado e análise da superfície dos elastômeros.
- **Ensaio Mecânicos:** Avaliação de propriedades como tração, rasgo e compressão, conforme normas ASTM e ISO específicas.
- **Ensaio Térmicos:** Caracterização do comportamento viscoelástico dos materiais em diferentes temperaturas e frequências por meio de um analisador dinâmico-mecânico (DMA).

Formulação de Novos Compostos: O projeto prevê o desenvolvimento de formulações otimizadas, utilizando resinas elastoméricas e aditivos específicos. Para tal, serão realizadas análises detalhadas do impacto das variáveis de processamento e da incorporação de material reciclado. Os compostos serão ajustados para atender às demandas técnicas e normativas das aplicações ferroviárias.

Simulações e Modelagem Computacional: A modelagem computacional será utilizada para prever e analisar o comportamento mecânico e térmico dos elastômeros.

- Serão desenvolvidas simulações utilizando **MATLAB®** para cálculos numéricos, **COMSOL® Multiphysics** para modelagem por elementos finitos, considerando os fenômenos físicos relevantes e o **Origin®** para geração de gráficos e análise de dados experimentais .
- Implementação de modelos no **SIMPACT®** para avaliar a resposta estrutural dos elastômeros sob diferentes configurações de carga e velocidade, complementando os ensaios experimentais analisar a resposta estrutural dos elastômeros sob diferentes condições de carga e velocidade, complementando os ensaios experimentais. O software permitirá prever o comportamento dos elastômeros diante de impactos, vibrações e esforços transmitidos pelo trilho aos vagões, auxiliando na otimização dos materiais e

no aumento da durabilidade dos componentes. Os parâmetros técnicos, incluindo propriedades dos materiais (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, densidade) e condições de contorno, serão definidos com base em dados experimentais e referências da literatura.

- Será implementada uma rotina computacional para otimização dos modelos, visando aumentar a precisão das previsões e minimizar discrepâncias em relação aos ensaios experimentais.

Materiais, Equipamentos e Softwares

Materiais

- a) **Matéria-prima:** A metodologia da pesquisa será baseada na avaliação dos efeitos das formulações atualmente utilizadas e as que serão desenvolvidas sobre as propriedades específicas para a aplicação final da proposta, bem como na análise da viabilidade do reaproveitamento dos compostos pós-consumo. Também serão avaliados os efeitos das variáveis ambientais que afetam a degradação dos componentes elastoméricos em sistemas ferroviários.

Como matéria-prima virgem, serão avaliadas as seguintes resinas poliméricas e aditivos: Elastômero Termoplástico (borracha que adiciona propriedades elásticas ao composto e outro polímero que fornece propriedades termoplásticas), com variações de seus componentes, formando elastômero de poliéster termoplástico - TPEE ou COPE. Dependendo do tempo do projeto, será possível a utilização de outras matrizes elastoméricas para expandir as possibilidades de uso em sistemas ferroviários, tais como EPDM, SBR, PEAD e PBAT (Polibuteno adipato co-tereftalato), com perfil biodegradável e flexível.

Os percentuais de mistura serão realizados tendo como polímero base a fase elastomérica, com demais componentes poliméricos adicionados em percentuais variando de 10 a 50%. Outros aditivos serão incorporados aos compostos para fins de compatibilização ou estabilização frente ao desgaste e/ou intempéries: negro de fumo, agentes antioxidantes multifuncionais (0,3 – 3 phr).

Está previsto na concepção do projeto o reaproveitamento de compostos (componentes) em fase de descarte para fins de reciclagem mecânica e o desenvolvimento de formulações com os demais polímeros sugeridos na proposta.

Toda a matéria-prima destinada à realização do projeto encontra-se disponível na UFPI.

- b) **Livros:** Para o desenvolvimento das pesquisas, será necessário adquirir títulos específicos. Embora a UFPI possua uma biblioteca geral bem equipada, a instituição não conta com uma biblioteca setorial voltada exclusivamente para as áreas de engenharia, o que pode limitar o acesso imediato a títulos técnicos especializados. Desta forma, estima-se a compra de quatro livros, ao custo variando entre R\$573,55 e R\$ 1.152,62 por unidade, como consta no Anexo IV. Com objetivo de continuidade de pesquisas, aprofundamento e compartilhamento de conhecimento, os títulos adquiridos serão incorporados ao acervo da Biblioteca Central da Universidade Federal do Piauí.

Equipamentos

- a) **Misturador interno:** Utilizado para a incorporação de aditivos em sistemas poliméricos, com capacidade de acompanhamento de reações de vulcanização e alterações reológicas. Esse equipamento é amplamente reconhecido na pesquisa em polímeros, sendo versátil e de grande aceitação tanto no meio acadêmico quanto na indústria.
- b) **Calandra de dois rolos:** Essencial para a mistura de polímeros com borracha, possibilitando uma melhor dispersão dos materiais. Esse equipamento otimiza as etapas de processamento, garantindo maior homogeneização das composições.
- c) **Máquina de ensaios mecânicos:** Destinada à avaliação do comportamento mecânico de componentes elastoméricos, permitindo testes de tração, compressão e flexão. Esse equipamento é fundamental para analisar os efeitos degradativos dos materiais e validar as formulações desenvolvidas.
- d) **Câmara de envelhecimento:** Equipamento destinado à avaliação dos efeitos das variações de temperatura e umidade nos componentes em análise sob envelhecimento de sistemas poliméricos, permitindo avaliar o limite adequado para tal exposição.
- e) **Analizador termogravimétrico - TGA:** Equipamento utilizado para a avaliação dos efeitos das variações de temperatura sobre o processo degradativo dos componentes ferroviários constituídos de material polimérico e elastômeros. Importante para a previsão de perda de massa dos componentes e pontos de falha.
- f) **Calorímetro exploratório diferencial:** Equipamento destinado à avaliação de processos de vulcanização das composições, variações de entalpia e transições térmicas dos componentes ferroviários constituídos de material polimérico e elastômeros.

Importante para a previsão de condições de obtenção de formulações específicas para o desempenho almejado.

- g) **Analizador dinâmico-mecânico:** Empregado para avaliar o comportamento viscoelástico dos elastômeros sob diferentes temperaturas e frequências. Esse equipamento permite prever as propriedades mecânicas dinâmicas dos materiais e otimizar suas formulações conforme as necessidades ferroviárias.
- h) **Computadores de Alto Desempenho:** Serão necessários seis computadores e um notebook de alta capacidade de processamento para as atividades de simulação e desenvolvimento de modelos pela equipe do projeto. Esses equipamentos devem possuir memória RAM adequada, espaço de armazenamento e capacidade de processamento paralelo, especialmente utilizando placas de vídeo de alto desempenho. O respectivo modelo atende aos requisitos mínimos para processar os programas necessários para as atividades de simulação e tratamento de dados.

Os equipamentos acima descritos serão transferidos e incorporados ao patrimônio da Universidade Federal do Piauí (UFPI), conforme previsto na Resolução 6.021 de 20 de julho de 2023, Art. 12 § 3º: “*Nos casos justificados pelo interesse social, os bens, produtos e estudos decorrentes da aplicação dos RDT e dos RPMF poderão ser transferidos a órgãos e entidades públicas, nas esferas federal, estadual/distrital ou municipal.*” garantindo impacto duradouro em pesquisas de ponta, contribuindo para a consolidação institucional como um centro de referência em pesquisas ferroviárias e no desenvolvimento de materiais elastoméricos de alto desempenho.

Cotações detalhadas dos respectivos equipamentos estão apresentadas no Anexo IV.

Softwares

- a) **COMSOL®:** A análise do comportamento mecânico e térmico dos elastômeros será conduzida utilizando o software COMSOL® Multiphysics, uma ferramenta amplamente reconhecida em engenharia e física aplicada. O COMSOL® é especialmente eficaz na modelagem, simulação e análise de problemas multifísicos, permitindo estudar fenômenos complexos com alta precisão. O software destaca-se por integrar múltiplos módulos que possibilitam a simulação de interações entre diferentes áreas da física, como dinâmica estrutural, transferência de calor e eletromagnetismo. Ele inclui modelos

específicos para materiais viscoelásticos, facilitando a análise de sua resposta sob diversas condições de carga e variações no tempo. Adicionalmente, o COMSOL[®] viabiliza análises paramétricas, estudos de sensibilidade e otimização de projetos, ampliando as possibilidades de pesquisa e desenvolvimento.

- b) **MATLAB[®]**: Software amplamente utilizado para o processamento de grandes volumes de dados e cálculos numéricos, essenciais para simulações complexas. Sua interface intuitiva com matrizes e vetores e o vasto conjunto de funções matemáticas tornam a modelagem e análise de comportamentos estruturais mais eficientes e precisas. Além disso, o software integra-se perfeitamente com outras ferramentas, como o COMSOL[®], permitindo um fluxo de trabalho contínuo entre a simulação e a análise de dados. A utilização de scripts no MATLAB[®] facilita a automação de tarefas como simulações paramétricas e análises de sensibilidade, otimizando a produtividade da equipe.
- c) **Origin[®]**: A condução da análise e visualização de dados científicos serão guiadas pelo software Origin[®], uma ferramenta amplamente reconhecida em pesquisa e engenharia. O Origin[®] é especialmente eficaz na manipulação, modelagem e interpretação de dados experimentais, permitindo análises estatísticas e gráficas com alta precisão. O software destaca-se por integrar múltiplas funcionalidades que possibilitam a criação de gráficos avançados, ajustes de curvas, testes estatísticos e modelagem matemática, inclui ferramentas específicas para análise de séries temporais, regressão não linear e processamento de grandes conjuntos de dados, facilitando a extração de informações relevantes. Adicionalmente, o Origin[®] viabiliza análises paramétricas, estudos de correlação e automação de processos por meio de scripts, ampliando as possibilidades de pesquisa e desenvolvimento.
- d) **SIMPACK[®]**: Software de simulação multicorpos amplamente utilizado na indústria ferroviária para modelar a dinâmica de vagões e locomotivas, permitindo prever seu comportamento em diferentes condições operacionais. Ele avalia a interação roda-trilho, simula vibrações e impactos, otimiza suspensões e reduz esforços estruturais, melhorando conforto, segurança e eficiência do transporte. Sua integração com o **Método dos Elementos Finitos (FEM)** possibilita análises estruturais mais precisas. Além da aplicação industrial, o SIMPACK[®] também é uma ferramenta valiosa no

ensino de engenharia, introduzindo estudantes à modelagem computacional de veículos ferroviários. Seu uso acadêmico auxilia na compreensão de conceitos dinâmicos e na otimização de sistemas, preparando futuros profissionais para desafios do setor ferroviário. Para o desenvolvimento do projeto, recomenda-se duas licenças pelo menos.

De forma semelhante, considerando a relevância para a continuidade de estudos/pesquisas no contexto de simulação e tratamento de dados, as respectivas licenças dos softwares serão transferidas para a UFPI.

Projetos Científicos e Acadêmicos

As linhas principais de trabalho gerarão projetos acadêmicos ou trabalhos de pesquisa desenvolvidos por cada membro da equipe. A seguir, são detalhadas as atividades específicas:

- **Pesquisador Líder:** Coordenará as atividades científicas e técnicas, garantindo a integração entre os eixos de pesquisa. Supervisionará análises experimentais e computacionais, além da formulação dos compostos elastoméricos. Também assumirá o papel de orientação de alunos de IC, Mestrando e Doutorando e acompanhará a elaboração de publicações técnicas e científicas via revistas e congressos.
- **Pesquisador 1:** Responsável pela caracterização das formulações. Conduzirá ensaios mecânicos, térmicos e químicos (FTIR, MEV, TGA, DMA) e analisará dados para correlacionar estrutura, propriedades e desempenho dos materiais.
- **Pesquisador 2:** Atuará na modelagem computacional e simulação de elastômeros, desenvolvendo rotinas para análise viscoelástica, previsão de falhas e otimização dos materiais, além de integrar dados experimentais e teóricos.
- **Pesquisador 3:** Desenvolverá modelos numéricos para previsão de fadiga em elastômeros, utilizando análise estrutural baseada em elementos finitos. Estudará a degradação mecânica dos materiais sob variações de temperatura, ciclos de carga e exposição a fluidos agressivos.
- **Mestrando 1:** Estudará as condições e proporções de misturas a partir de matéria-prima de componentes já utilizados em sistemas ferroviários e avaliar limites e condições de utilização a partir da incorporação de matéria-prima virgem.

- **Mestrando 2:** Avaliará o comportamento viscoelástico de sistemas elastoméricos para aplicações em sistemas ferroviários sob o aspecto da reologia e variáveis como força e deformação e validará dados a partir de simulações.
- **Doutorando:** Desenvolverá composições elastoméricas contendo polímero biodegradável e será responsável pela avaliação do desempenho mecânico sob diferentes sistemas de forças, tração e compressão, e efeitos da temperatura sobre os sistemas desenvolvidos para sistemas ferroviários, seguindo respectivas normas técnicas e abordará simulações e modelos preditivos.
- **Iniciação científica 1:** Será responsável pela avaliação dos efeitos em câmara de envelhecimento de temperatura e umidade sobre o desempenho mecânico de formulações contendo elastômero e polímero biodegradável.
- **Iniciação científica 2:** Avaliará os efeitos em câmara de envelhecimento de temperatura e umidade sobre o desempenho térmico, com avaliação de processos de oxidação/degradação de formulações contendo elastômero e polímero biodegradável
- **Iniciação Científica 3:** Este estudo aplicará o **Método dos Elementos Finitos (FEM)** para modelar e analisar tensões e deformações em componentes elastoméricos de freios ferroviários, como pastilhas, mangueiras e válvulas. Serão avaliadas diferentes condições de carga e temperatura, considerando o comportamento viscoelástico dos materiais. A pesquisa buscará identificar pontos críticos de falha, otimizar o design estrutural e aumentar a durabilidade e confiabilidade dos componentes, utilizando o **COMSOL® Multiphysics** para a simulação e validação dos modelos.
- **Iniciação Científica 4:** O bolsista utilizará o **COMSOL® Multiphysics** para modelar e simular o comportamento viscoelástico de elastômeros aplicados em **PADs e mangueiras de freio ferroviário**. O estudo analisará a resposta mecânica desses materiais sob diferentes condições de temperatura e carga, avaliando parâmetros como relaxação de tensão e dissipação de energia. A pesquisa visa otimizar as propriedades dos elastômeros, garantindo maior eficiência e durabilidade dos componentes em serviço.
- **Iniciação Científica 5:** Esta pesquisa consiste em desenvolver um **modelo preditivo** para correlacionar a degradação de elastômeros ferroviários com fatores ambientais como **temperatura, pressão e exposição a fluidos**. O estudo abordará os mecanismos

de envelhecimento mecânico e químico dos materiais, aplicando métodos numéricos para prever seu desempenho ao longo do tempo. O objetivo é definir limites operacionais seguros e propor estratégias para mitigar a degradação, como ajustes na formulação ou uso de aditivos protetores.

- **Iniciação Científica 6:** Esta pesquisa introduzirá o aluno à modelagem e simulação da dinâmica de vagões ferroviários no **SIMPACK[®]**, considerando suspensão, amortecimento e interação com os trilhos. O estudante aprenderá a configurar simulações para analisar vibrações, esforços estruturais e impacto da geometria da via, visando otimizar conforto, segurança e durabilidade dos componentes..
- **Iniciação Científica 7:** Com base em dados provenientes de análises experimentais e/ou numéricas, o discente aplicará inteligência artificial para realizar o pré-processamento, definir e treinar o modelo da rede neural, além de avaliar sua precisão. A eficácia da técnica proposta será validada por meio da comparação com métodos tradicionais. O objetivo é desenvolver um modelo eficiente que contribua para o avanço na previsão de fadiga em PADs.

3.2 Etapas

As principais etapas do projeto são apresentadas a seguir, juntamente com as atividades previstas para cada uma. Os resultados serão divulgados anualmente por meio de relatórios técnicos e científicos, incluindo anexos com os programas desenvolvidos e manuais detalhados. Os prazos e as etapas de execução estão organizados no ANEXO II – “Cronograma Físico-Financeiro”.

ETAPA 1 - Revisão Bibliográfica, Apropriação de Conhecimento Técnico, Ensaios Laboratoriais

Atividade 1: Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica será conduzida continuamente ao longo do projeto, sendo essencial para sua fundamentação. Essa atividade reunirá informações de fontes confiáveis, como artigos científicos, patentes e normas técnicas, garantindo uma base sólida de conhecimento. Além de mapear práticas avançadas e identificar lacunas no conhecimento existente, a revisão orientará o desenvolvimento metodológico, permitindo a formulação de soluções inovadoras.

Com essa base, o projeto estará fundamentado em premissas bem definidas, construídas a partir do entendimento sobre os materiais elastoméricos, suas aplicações em sistemas ferroviários e os

desafios relacionados à durabilidade e ao desempenho em condições extremas. Esse conhecimento direcionará investigações, avaliações e testes, fornecendo uma estrutura essencial para a execução eficaz e o alcance dos objetivos do projeto.

O produto dessa atividade será um documento técnico abrangente, sintetizando o conhecimento adquirido e detalhando as premissas e diretrizes metodológicas da pesquisa. Esse material integrará o Relatório Anual 1, servindo como referência para as próximas etapas do projeto.

Atividade 2: Aquisição de equipamentos para o desenvolvimento do projeto

Para o desenvolvimento da proposta, seja pela necessidade de processamentos específicos, seja por demanda de caracterizações específicas, a aquisição de equipamentos do tipo calandra de dois rolos, misturador interno, câmara de envelhecimento, analisador termogravimétrico, equipamento de calorimetria exploratória diferencial, analisador dinâmico mecânico, computadores, notebooks e softwares de simulação e tratamento de dados será fundamental para a obtenção dos resultados previstos com uma infraestrutura moderna e de alta precisão.

Cabe destacar que tal etapa, dentro do cronograma de atividades é requisito para a realização de atividades dos pesquisadores e de todos os bolsistas.

Atividade 3: Seleção e Envio de Amostras para Apropriação de Conhecimento Técnico

Para fins de comparação e estabelecimento de limites funcionais e técnicos, amostras de materiais utilizados pela concessionária serão caracterizadas pela instituição executora. Os dados obtidos servirão de base para as próximas etapas do projeto.

O resultado será um relatório detalhado com as características das amostras selecionadas, os critérios adotados para sua escolha e os objetivos específicos das análises. Esses dados fornecerão uma caracterização aprofundada dos materiais, essencial para o desenvolvimento de formulações otimizadas nas próximas etapas.

Atividade 4 : Estabelecimento e Quantificação de Amostras Virgens e Pós-Consumo

A pesquisa avaliará os efeitos das formulações utilizadas e desenvolvidas, considerando as propriedades necessárias para as aplicações propostas. O estudo analisará o reaproveitamento de compostos pós-consumo e os impactos de variáveis degradativas, como temperatura, umidade e exposição química, sobre os componentes elastoméricos ferroviários. Diferentes resinas poliméricas e aditivos serão estudados, incluindo elastômeros termoplásticos formados pela combinação de borracha, que confere propriedades elásticas, com polímeros termoplásticos,

resultando em elastômeros de poliéster termoplástico (TPEE ou COPE). Também serão exploradas outras matrizes elastoméricas, como EPDM, SBR, PEAD e PBAT, conhecidas por sua flexibilidade e biodegradabilidade.

O projeto prevê o reaproveitamento de compostos descartados para promover sua reciclagem mecânica e desenvolver formulações otimizadas. Serão realizados testes para determinar o teor ideal de cada componente, seguidos por análises mecânicas, térmicas e morfológicas. Essa abordagem pode melhorar a gestão de resíduos da concessionária. As misturas serão formuladas com base na fase elastomérica do polímero, variando os componentes entre 1% e 50%. Além disso, aditivos como negro de fumo e agentes antioxidantes multifuncionais, em concentrações de 0,3 a 3 phr, serão incorporados para melhorar a compatibilidade e a resistência ao desgaste e intempéries.

Os testes de reprocessabilidade serão realizados com misturador interno e calandra, aplicando de um a cinco ciclos. Após cada ciclo, amostras serão coletadas para caracterização detalhada, possibilitando propostas de reaproveitamento e análise da degradação dos compostos. Esses equipamentos, inéditos na instituição, mas já amplamente dominados pelos pesquisadores, serão adquiridos no âmbito deste projeto. As composições finais serão ajustadas com base nas condições de processamento e avaliadas conforme normas NBR, ASTM e ISO.

O resultado dessa atividade será um relatório técnico consolidando os resultados das análises das amostras virgens e pós-consumo, incluindo caracterização química, mecânica, térmica e morfológica das formulações. Também será apresentado um estudo de viabilidade do reaproveitamento de compostos, avaliando sua reprocessabilidade e destacando melhorias em compatibilidade e resistência às intempéries. Os resultados fornecerão base técnica para as próximas etapas do projeto.

Atividade 5: Apropriação de Conhecimento Técnico

A apropriação de conhecimento técnico será uma etapa crucial do projeto, permitindo a análise da morfologia e da composição química das formulações, com o objetivo de implementar melhorias e ajustes composicionais. Esses ajustes buscarão atender às demandas de resistência mecânica e vida útil dos componentes. Técnicas consagradas, como Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), serão utilizadas para fornecer bases sólidas ao aprimoramento técnico.

O produto dessa atividade será um relatório técnico sintetizando os resultados das análises de morfologia e composição química. O documento incluirá recomendações para ajustes

composicionais voltados à melhoria da resistência mecânica e à ampliação da vida útil dos componentes.

Atividade 6: Definição de Requisitos para Ensaios de Laboratório

O planejamento do projeto prevê ensaios mecânicos, térmicos e morfológicos para avaliar os efeitos das formulações em diferentes condições ambientais. Ensaios de tração, compressão e rasgo serão realizados conforme normas ASTM, ISO e NBR, utilizando equipamentos avançados, como o analisador dinâmico-mecânico (DMA), para caracterização viscoelástica detalhada dos materiais.

O resultado dessa etapa será a elaboração de especificações técnicas consolidando os resultados das análises de morfologia e composição química das formulações. Os documentos incluirão recomendações para ajustes composicionais voltados à melhoria da resistência mecânica e da vida útil dos componentes. Também definirão parâmetros, procedimentos e normas para a realização dos ensaios laboratoriais.

ETAPA 2 - Desenvolvimento de Novas Formulações

Atividade 1: Desenvolvimento de novas formulações com componentes elastoméricos e biodegradáveis

O projeto prevê o reaproveitamento de compostos descartados para reciclagem mecânica e o desenvolvimento de formulações com os polímeros sugeridos, incluindo a presença de polímeros biodegradáveis, alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Os percentuais de mistura serão definidos considerando a fase elastomérica do polímero, com os demais componentes adicionados em proporções entre 1% e 50%. Aditivos como negro de fumo e agentes antioxidantes multifuncionais (0,3 a 3 phr) serão incorporados para melhorar a compatibilidade e aumentar a resistência ao desgaste e às intempéries.

Essa atividade permitirá a criação de materiais inovadores, otimizando o desempenho dos elastômeros em aplicações ferroviárias e ampliando suas possibilidades de uso em sistemas que exigem alta durabilidade e resistência a condições extremas.

Ao final dessa etapa, serão elaborados relatórios técnicos detalhando as formulações, os percentuais de mistura e os impactos dos aditivos no desempenho dos compostos. A caracterização completa dos materiais será realizada por meio de análises mecânicas, térmicas e químicas para validar sua resistência ao desgaste e às intempéries. Como resultado, serão

geradas formulações prontas para testes laboratoriais e validação em condições operacionais ferroviárias, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e eficientes.

Atividade 2: Desenvolvimento de Modelos Preditivos e Simulações

As simulações numéricas do projeto serão realizadas em etapas estruturadas, utilizando ferramentas computacionais avançadas como MATLAB® e COMSOL® Multiphysics. Essas simulações permitirão a análise detalhada do comportamento dos materiais elastoméricos em diferentes condições, contribuindo para a compreensão e otimização de suas propriedades. As etapas previstas são:

- **Definição do Escopo e Parâmetros de Entrada:** Serão definidos os objetivos específicos das simulações e os parâmetros de entrada, como propriedades dos materiais (módulo de elasticidade, densidade, coeficiente de Poisson) e condições de contorno para aplicações ferroviárias. Os dados experimentais coletados nas etapas laboratoriais serão utilizados para garantir simulações representativas.
- **Modelagem Geométrica e Configuração do Modelo Computacional:** No COMSOL®, será desenvolvida a modelagem geométrica dos componentes elastoméricos, considerando suas dimensões e configurações reais. Paralelamente, modelos matemáticos serão configurados no MATLAB® para análise paramétrica e validação dos resultados obtidos. A integração entre essas plataformas permitirá ajustes contínuos nos modelos conforme os resultados forem validados.
- **Simulação do Comportamento Mecânico e Térmico:** Serão realizadas simulações mecânicas e térmicas para avaliar o desempenho dos materiais sob diferentes condições operacionais, como variações de temperatura, pressão e carregamentos dinâmicos. O COMSOL® será usado para análise multifísica detalhada, enquanto o MATLAB® auxiliará no processamento de dados e otimização.
- **Estudo de Comportamento Viscoelástico e Previsão de Vida Útil:** A modelagem viscoelástica avançada permitirá investigar a resposta dos materiais a esforços cíclicos e condições extremas, como exposição prolongada a agentes químicos e variações de temperatura. A previsão de vida útil será realizada com base em simulações de degradação e dados experimentais. Nesta etapa, o SIMPACK® pode ser empregado para prever como diferentes formulações elastoméricas impactam a resposta dinâmica do vagão, auxiliando na otimização dos materiais.

- **Validação dos Modelos e Refinamento:** Os resultados das simulações serão comparados com os dados experimentais obtidos nos laboratórios da UFPI, permitindo a validação e o refinamento dos modelos, garantindo que reflitam com precisão o comportamento real dos materiais.
- **Análise de Otimização e Proposta de Melhorias:** Com base nas simulações validadas, serão realizadas análises de otimização para identificar formulações e configurações que maximizem a resistência, durabilidade e eficiência dos elastômeros. O MATLAB[®] será utilizado para desenvolver rotinas de otimização, enquanto o COMSOL[®] auxiliará na avaliação de diferentes cenários.
- **Elaboração de Relatórios e Integração com Outras Etapas do Projeto:** Por fim, serão elaborados relatórios técnicos detalhando as metodologias, os resultados e as recomendações das simulações numéricas. Esses documentos integrarão os resultados às demais etapas do projeto, fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis.
- **Análise e tratamento de dados:** O tratamento estatístico e estabelecimento de correlações entre as variáveis do projeto serão realizados via ORIGIN[®] com recursos que potencializarão a interpretação dos resultados.

Essas etapas garantirão que as simulações numéricas contribuam significativamente para o entendimento e aprimoramento das formulações elastoméricas, otimizando seu desempenho em aplicações ferroviárias e fortalecendo a base científica do projeto.

O produto dessa etapa incluirá um relatório técnico detalhado com as metodologias, resultados e recomendações das simulações numéricas. Serão entregues modelos computacionais validados no COMSOL[®] e MATLAB[®], juntamente com os códigos desenvolvidos, permitindo replicação e futuras otimizações. O estudo fornecerá previsões da vida útil dos elastômeros, identificará formulações otimizadas e integrará os resultados às demais etapas do projeto, contribuindo para o aprimoramento das formulações e sua validação em condições operacionais reais.

4 PREVISÃO DE INÍCIO, TEMPO DE EXECUÇÃO E CUSTO TOTAL

Este projeto será desenvolvido ao longo de 36 meses, a partir da conclusão da tramitação interna na Universidade Federal do Piauí (UFPI) e da disponibilização dos recursos iniciais previstos. O início das atividades está programado para 01/10/2025, com a execução dos trabalhos pelos

pesquisadores e doutorandos. A participação dos alunos nos programas de pós-graduação e iniciação científica ocorrerá seguindo o calendário acadêmico da universidade.

O custo total do projeto está estimado em **R\$ 7.499.576,11 (sete milhões, quatrocentos e noventa e nove mil, quinhentos e setenta e seis reais e onze centavos)**, incluindo a taxa de ressarcimento institucional da UFPI (3%) e taxa da fundação de apoio FADEX (5%) que cobrem despesas administrativas e operacionais, garantindo o suporte necessário para a execução da pesquisa. Tais taxas estão em conformidade com o Ofício nº1/2025 de 28 de fevereiro de 2025 da Pró-Reitoria de Planejamento e Orçamento (vide anexo IV deste plano de trabalho), além de taxas de importação de equipamentos limitadas a 20% do valor do equipamento conforme referências em editais nacionais de fomento via FINEP.

- Valor de investimento 2025 (ano contratual 5): R\$ 2.377.600,62
- Valor de investimento 2026 (ano contratual 6): R\$ 4.014.389,69
- Valor de investimento 2027 (ano contratual 7): R\$ 650.228,46
- Valor de investimento 2028 (ano contratual 8): R\$ 457.357,34

O valor também contempla o provisionamento da concessionária para despesas administrativas (7,37%) a partir do ano 2 (a concessionária não tem capacidade executiva para utilização do recursos no ano 1) e reserva técnica (5%), conforme § 5º do art. 10. da Resolução nº 6.021, de 2023 e § 4º do art. 6 da Portaria nº 17, de 06 de dezembro de 2023 respectivamente. A concessionária fundamenta-se no exercício legítimo da prerrogativa de alocação de recursos à Reserva Técnica, em razão da complexidade e da amplitude do projeto, bem como das incertezas inerentes a fatores externos que podem impactar sua execução. Tal previsão encontra respaldo no § 4º do art. 6º da Portaria nº 17, de 6 de dezembro de 2023, com redação conferida pela Portaria nº 9, de 9 de agosto de 2024, nos seguintes termos: “A concessionária poderá prever um valor de até 5% do projeto para Reserva Técnica, com a finalidade de atender a despesas imprevistas e diretamente relacionadas à execução do projeto.”.

A gestão financeira será realizada conforme as normativas institucionais e em conformidade com as diretrizes de prestação de contas estabelecidas para projetos de pesquisa. O Cronograma Físico-Financeiro detalhado pode ser consultado no ANEXO II, enquanto o Orçamento Analítico está apresentado no ANEXO VI, seguindo os padrões estabelecidos pela legislação vigente aplicável ao financiamento de projetos acadêmicos e tecnológicos.

5 LOCAL DE EXECUÇÃO

O projeto será executado nas dependências da Universidade Federal do Piauí, no Centro de Tecnologia. As etapas de investigação, incluindo os processos experimentais, serão realizadas em espaços específicos e adequadamente equipados, com a infraestrutura necessária e disponibilidade para acomodar os equipamentos que serão adquiridos:

- **Laboratório de Polímeros e Materiais Conjugados – LAPCON:** Localizado no Centro de Tecnologia, com área de 92,00 m², este laboratório está equipado com bancadas laterais e centrais, além de contar com equipamentos como estufa, extrusora monorosca, impressoras 3D, banho com aquecimento, prensas com aquecimento e moinho de facas.
- **Laboratório de Materiais Poliméricos – Curso de Engenharia de Materiais:** Também no Centro de Tecnologia, este laboratório possui uma área de 90,00 m², com bancadas laterais e equipamentos como injetora de termoplásticos, entalhador, destilador de água, estufa com circulação de ar, equipamento de resistência ao impacto, além de espaço disponível para a instalação de novos equipamentos a serem adquiridos por meio da presente proposta, como máquina de ensaios, misturador interno, calandra, TGA, DSC, DMA e câmara de envelhecimento.
- **Laboratório de Métodos em Modelagem Computacional – LAMEC:** Este espaço, com área de 25,00 m², está preparado com bancadas laterais para a instalação dos computadores e respectivos softwares a serem adquiridos por meio do projeto.
- **Laboratório de Estruturas – LABEST:** Área aproximada: 132 m². Conta com infraestrutura e instrumental necessários para a realização de ensaios mecânicos destrutivos e não destrutivos. O Laboratório é composto pelos seguintes equipamentos: uma máquina universal de ensaios mecânicos, um esclerômetro analógico para concreto com bigorna de calibração, uma câmera termográfica compacta Flir C5, um drone DJI-Mini 3, quatro peneiras para agregados graúdos, dez formas para moldagem de corpos de provas cilíndricos de concreto, um paquímetro digital de 30 cm, três módulos de aquisição de dados Spider 8, um computador de mesa, quatro sensores de deslocamento potenciométricos (15 cm) e uma laje de reação para ensaios mecânicos.

6 ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA

6.1 Identificação da Entidade

A entidade executora será a Universidade Federal do Piauí – UFPI. A Universidade Federal do Piauí (UFPI), instituída pela Lei nº 5.528, de 11 de novembro de 1968, é uma universidade pública federal com sede no Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, em Teresina, Piauí. Desde a sua fundação, a UFPI tem sido protagonista no desenvolvimento educacional, científico e tecnológico do estado, oferecendo ensino de excelência em cursos de graduação e pós-graduação, fomentando a pesquisa e promovendo ações de extensão que impactam a sociedade.

O projeto contará com a interveniência da FADEX – Fundação de Amparo ao Desenvolvimento Científico, Tecnológico e de Inovação - cujas atribuições e obrigações estarão sobre a gestão administrativa e financeira dos recursos financeiros previstos e estritamente necessários à execução do referido projeto, prestação de contas, realização de contratos, pagamentos, recolhimento de taxas/encargos/impostos, dentre outras previstas no acordo de parceria.

Estrutura e Expansão Acadêmica

A Universidade Federal do Piauí (UFPI) conta com cinco campi principais, estrategicamente localizados para atender às diferentes regiões do estado. O Campus Ministro Petrônio Portella, situado em Teresina, é a sede da universidade e abriga centros acadêmicos voltados para as ciências da saúde, humanas, exatas, agrárias e tecnológicas. O Campus Ministro Reis Velloso, localizado em Parnaíba, tem como foco atender à região norte do estado. Já o Campus Senador Helvídio Nunes de Barros, em Picos, é um importante polo educacional no centro-sul piauiense. O Campus Amílcar Ferreira Sobral, em Floriano, destaca-se por oferecer cursos que atendem à região sudoeste. Por fim, o Campus Cinobelina Elvas, em Bom Jesus, é voltado especialmente para as áreas de ciências agrárias e ambientais no extremo sul do estado.

Além dos campi, a UFPI mantém colégios técnicos e agrários em Teresina, Floriano e Bom Jesus, que desempenham um papel essencial na formação técnica e no fortalecimento do setor agrícola regional. Com uma oferta superior a 50 cursos de graduação e uma ampla variedade de programas de pós-graduação stricto sensu, a UFPI destaca-se nacionalmente com programas avaliados com a nota 6 pela CAPES, como o Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais e o Programa de Pós-Graduação em Saúde da Família. Esses cursos são reconhecidos

por sua excelência acadêmica e impacto científico, posicionando a universidade como referência em ensino e pesquisa no Brasil e no exterior.

Projetos de Pesquisa Reconhecidos

A UFPI lidera projetos de relevância nacional e internacional, como:

- **Pesquisa em Bioeconomia e Sustentabilidade:** No Campus Cinobelina Elvas (Bom Jesus), estudos focados no uso sustentável do Cerrado Piauiense, incluindo o desenvolvimento de bioinsumos agrícolas e novas tecnologias para a pecuária.
- **Centro de Ciências da Natureza (CCN):** Projetos ligados à energia renovável e ao desenvolvimento de tecnologias fotovoltaicas, com impacto direto no semiárido brasileiro.
- **Saúde Pública e Familiar:** A UFPI participa de iniciativas que investigam melhorias no Sistema Único de Saúde (SUS), com destaque para o Mestrado Profissional em Saúde da Família, em parceria com instituições de pesquisa de todo o Brasil.
- **Tecnologia da Informação e Automação:** No Centro de Tecnologia, destacam-se projetos sobre inteligência artificial, robótica e automação industrial, desenvolvidos em colaboração com empresas e agências de fomento.

Centro de Tecnologia da UFPI: Excelência Acadêmica e Impacto Científico

O Centro de Tecnologia (CT) é um dos principais polos acadêmicos e de pesquisa da Universidade Federal do Piauí (UFPI). Fundado em 1975, o CT tem desempenhado um papel estratégico na formação de profissionais qualificados e no desenvolvimento científico e tecnológico da região. Com uma infraestrutura moderna e uma ampla gama de cursos e projetos, destaca-se pelo impacto educacional e social, contribuindo para o avanço da engenharia, arquitetura e tecnologia no Brasil.

Atualmente, o CT abriga sete cursos de graduação: Engenharia Civil, Engenharia Elétrica, Engenharia de Produção, Engenharia Mecânica, Engenharia de Materiais, Arquitetura e Urbanismo e Engenharia de Agrimensura e Cartográfica. Esses cursos oferecem uma formação abrangente e de alta qualidade, preparando os estudantes para atuar em diversos setores estratégicos, impulsionando o desenvolvimento regional e nacional.

Além da graduação, o Centro de Tecnologia conta com programas de pós-graduação *stricto sensu*, incluindo o Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, que possui nota 6 pela CAPES, sendo referência nacional na área. O Mestrado em Engenharia Elétrica também se destaca como um centro de excelência em pesquisa e inovação tecnológica, formando profissionais altamente qualificados para o setor acadêmico e industrial.

Com mais de 2.000 alunos matriculados nos cursos de graduação e pós-graduação, o CT desempenha um papel fundamental na formação de engenheiros, cientistas e arquitetos que contribuem ativamente para o crescimento do Piauí e do Brasil. Seu compromisso com a pesquisa e inovação se reflete na alta avaliação de seus programas pela CAPES, consolidando sua relevância no cenário acadêmico e tecnológico nacional.

Laboratórios de Ponta

O Centro de Tecnologia possui infraestrutura de alto nível, incluindo modernos laboratórios que suportam pesquisas avançadas em diversas áreas, como:

- **Laboratório de Polímeros e Materiais Conjugados (LAPCON):** Pesquisa aplicada na área de materiais poliméricos, compósitos e blenda.
- **Laboratório de Engenharia Elétrica e Automação:** Focado em sistemas de energia elétrica, automação industrial, eficiência energética e redes inteligentes.
- **Grupo de Estudos Avançados em Processos Industriais (GEAPI):** Desenvolvimento de soluções inovadoras para processos industriais e logística.

Projetos de Extensão e Formação Integral do Aluno

Os projetos de extensão do Centro de Tecnologia (CT) desempenham um papel essencial na integração entre universidade e sociedade, promovendo a aplicação prática do conhecimento acadêmico, o desenvolvimento de competências socioemocionais e a formação de cidadãos mais conscientes e engajados.

Projetos SAE - Society of Automotive Engineers

Os projetos vinculados à SAE (Society of Automotive Engineers) proporcionam aos alunos a oportunidade de aplicar conceitos de engenharia de forma prática e criativa, além de incentivarem o trabalho em equipe, a liderança e a solução de problemas complexos. Esses

projetos também contribuem para o desenvolvimento sustentável ao explorar tecnologias inovadoras e eficientes. Entre os destaques estão:

- **Bull Racing - Fórmula SAE:** Desenvolvimento de protótipos automotivos para competições de Fórmula SAE, onde os alunos projetam, constroem e testam carros de corrida de alto desempenho.
- **B-R-O BRÓ Baja:** Construção de veículos off-road para competir nas provas de resistência e desempenho da SAE Baja, integrando práticas sustentáveis e tecnologias robustas.
- **Delta do Piauí Aerodesign:** Desenvolvimento de aeronaves radiocontroladas para competições de Aerodesign, promovendo o uso de materiais leves e eficientes e a aplicação de conceitos de engenharia aeroespacial.

Esses projetos coctam teoria e prática, estimulando o desenvolvimento de competências técnicas e comportamentais fundamentais para o mercado de trabalho.

Outros Projetos de Extensão

Além das iniciativas da SAE, o CT desenvolve diversos outros projetos que impactam positivamente os alunos e a sociedade:

- **Cine CT:** Sessões de cinema temático seguidas de debates sobre temas relacionados à tecnologia, sociedade e sustentabilidade, promovendo a reflexão crítica e o diálogo interdisciplinar.
- **GiraMinds:** Programa de acolhimento e apoio a estudantes nos primeiros períodos do curso, com foco na redução da evasão acadêmica e no fortalecimento do senso de comunidade no ambiente universitário.
- **K-12 (Oficinas para Escolas de Ensino Médio):** Atividades práticas que despertam o interesse de jovens pela engenharia, ciência e tecnologia, incentivando a educação inclusiva.

- **Cajuínas Makers:** Programa destinado a inserção de alunas de cursos de Engenharia/Ciências Exatas no ambiente da manufatura aditiva como forma de construção e fixação de mulheres em ambientes tecnológicos.

Essas iniciativas refletem o compromisso do Centro de Tecnologia em formar profissionais altamente capacitados, socialmente responsáveis e preparados para enfrentar os desafios do século XXI. Alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial ao ODS 4 (Educação de Qualidade), que promove uma educação inclusiva e equitativa, e ao ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), que incentiva a inovação tecnológica e o desenvolvimento sustentável, o CT não apenas contribui para a excelência acadêmica, mas também fomenta a inovação e o progresso socioeconômico no estado do Piauí e no Brasil.

Considerando o exposto no texto supracitado, a Universidade Federal do Piauí é a entidade que executará o projeto em sua totalidade, sendo escolhida com base na análise técnica e financeira da proposta do projeto, bem como na capacidade de execução da entidade. Adicionalmente, este projeto não prevê a concessionária como executora do projeto, limitando-se ao escopo de gerir a execução do projeto pela entidade executora, de forma alinhada e aderente às obrigações regulatórias e contratuais atribuídas à concessionária pelo poder concedente.

6.2 Identificação da Equipe Executora

A equipe executora da UFPI é composta por Pesquisadores Bolsistas de Incentivo à Inovação, pós-doutorandos, doutorandos, mestrandos e alunos de iniciação científica. As Bolsas de Incentivo à Inovação são regidas pela Lei 13.243, de 11 de janeiro de 2016, artigo 9º, em consonância com a Lei 10.973, de 2 de dezembro de 2004, que define:

“É facultado à ICT celebrar acordos de parceria com instituições públicas e privadas para realização de atividades conjuntas de pesquisa científica e tecnológica e de desenvolvimento de tecnologia, produto, serviço ou processo.

§ 1º O servidor, o militar, o empregado da ICT pública e o aluno de curso técnico, de graduação ou de pós-graduação envolvidos na execução das atividades previstas no caput poderão receber bolsa de estímulo à inovação diretamente da ICT a que estejam vinculados, de fundação de apoio ou de agência de fomento...”

Pesquisadores do Projeto

- Profa. Dra. Tatianny Soares Alves
Professora Adjunta da UFPI – Pesquisadora Líder e Coordenadora do projeto.

Período: 36 meses.

CPF: 040.848.904-99.

Valor: R\$ 5.200,00.

- Pesquisador 1

Período: 36 meses.

Valor: R\$ 5.200,00.

- Pesquisador 2

Período: 36 meses.

Valor: R\$ 5.200,00.

- Pesquisador 3

Período: 36 meses.

Valor: R\$ 5.200,00.

Para as bolsas de pesquisadores e coordenador, complementarmente ao artigo citado acima, foram consideradas a aplicação das normas institucionais: [Resoluções CEPEX/UFPI nº 345, de 05 de setembro de 2022](#) e Resolução CAD/UFPI Nº 171, de 29 de outubro de 2024. Como referência exclusivamente de valor, está sendo adotada neste projeto a modalidade DTI-A do CNPQ, que possui a finalidade de possibilitar o fortalecimento da equipe responsável pelo desenvolvimento de projeto de pesquisa, desenvolvimento ou inovação, por meio da incorporação de profissional qualificado para a execução de uma atividade específica.

Demais Membros da Equipe

Os membros da equipe, listados abaixo, serão selecionados após a aprovação do projeto pela ANTT, uma vez que a seleção depende da garantia de bolsas para os participantes. As funções de cada membro na pesquisa estão detalhadas no item 3 (três) deste projeto. Os valores das bolsas seguem as diretrizes da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), conforme a Portaria 17 (6 de dezembro de 2023), Artigo 32, Item III, parágrafo 3º. Os valores de referência estão disponíveis em: <https://fapesp.br/valores/bolsasnopais>.

Perfil	Período	Bolsa	Referência
Doutorando 1	31 meses	R\$ 5.520,00	FAPESP-DD-I
Mestrando 1	17 meses	R\$ 3.120,00	FAPESP-MS-I
Mestrando 2	24 meses	R\$ 3.120,00	FAPESP-MS-I
Iniciação Científica 1	36 meses	R\$ 1.080,00	FAPESP-IC
Iniciação Científica 2	36 meses	R\$ 1.080,00	FAPESP-IC

Perfil	Período	Bolsa	Referência
Iniciação Científica 3	36 meses	R\$ 1.080,00	FAPESP-IC
Iniciação Científica 4	36 meses	R\$ 1.080,00	FAPESP-IC
Iniciação Científica 5	36 meses	R\$ 1.080,00	FAPESP-IC
Iniciação Científica 6	36 meses	R\$ 1.080,00	FAPESP-IC
Iniciação Científica 7	36 meses	R\$ 1.080,00	FAPESP-IC

7 PRODUTOS

O produto final deste projeto será um conjunto de metodologias, formulações e especificações técnicas para materiais elastoméricos utilizados em sistemas ferroviários, visando melhoria de desempenho, sustentabilidade e aumento da vida útil desses componentes. Dentre os principais resultados esperados, destacam-se:

- **Metodologia de caracterização de composições elastoméricas**, aplicável a válvulas, mangueiras e PADs do sistema de freios ferroviários.
- **Determinação de formulações otimizadas**, utilizando materiais recicláveis e biodegradáveis para reduzir impactos ambientais.
- **Modelo preditivo de vida útil** dos elastômeros baseado em análise de degradação térmica, mecânica e química.
- **Banco de dados técnico**, correlacionando composição, propriedades mecânicas e desempenho operacional dos elastômeros em diferentes condições ferroviárias.
- **Definição de parâmetros mínimos de qualidade**, garantindo que os componentes elastoméricos atendam aos requisitos normativos do setor.
- **Publicação de artigos científicos**, promovendo a disseminação dos resultados e contribuindo para o avanço da pesquisa na área.
- **Capacitação de recursos humanos**, com a formação de mestres, doutores e pesquisadores especializados na área de elastômeros para aplicações ferroviárias.

- **Transferência de conhecimento** para a indústria ferroviária e instituições acadêmicas, promovendo inovação e avanço tecnológico no setor.

O Relatório Final do Projeto consolidará todos os dados experimentais, metodologias aplicadas e análises computacionais, assegurando que os resultados possam ser utilizados para aprimoramento de processos industriais, desenvolvimento de novos materiais e melhorias operacionais no setor ferroviário.

Os produtos desenvolvidos estarão em plena conformidade com a Resolução Nº 6.021, de 20 de julho de 2023, que rege a propriedade e a utilização dos resultados obtidos por meio dos RDT (Recursos para Desenvolvimento Tecnológico) conforme disposto no Art. 12. Dessa forma, os resultados obtidos ao longo do projeto estarão disponíveis para utilização por concessionárias, parceiros ou qualquer empresa do setor ferroviário, garantindo sua disseminação e aplicação prática. Além disso, o conhecimento gerado contribuirá para o avanço científico e tecnológico, permitindo futuras inovações e melhorias na infraestrutura ferroviária nacional.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / NORMATIVOS APLICÁVEIS

BRASIL. Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023. Dispõe sobre os recursos para desenvolvimento tecnológico e para pesquisa, desenvolvimento e monitoramento ferroviário e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 21 jul. 2023.

BRASIL. LEI Nº 5.528, DE 12 DE NOVEMBRO DE 1968. Autoriza o Poder Executivo a instituir a Universidade Federal do Piauí e dá outras providências.

BRASIL. Lei nº 10.973, de 2 de dezembro de 2004. Dispõe sobre incentivos à inovação e à pesquisa científica e tecnológica no ambiente produtivo e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 3 dez. 2004.

BRASIL. Lei nº 13.243, de 11 de janeiro de 2016. Dispõe sobre incentivos à inovação e à pesquisa científica e tecnológica no ambiente produtivo e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 12 jan. 2016.

GENT, A. N. Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components. 3rd ed. Munich: Hanser, 2012.

RIVLIN, R. S.; THOMAS, A. G. Rupture of Rubber. I. Characteristic Energy for Tearing. **Journal of Polymer Science**, v. 10, n. 3, p. 291–318, 1953. DOI: 10.1002/pol.1953.120101302.

SÃO PAULO (Estado). Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Portaria nº 17, de 6 de dezembro de 2023. Dispõe sobre XXX. Disponível em: <https://fapesp.br/valores/bolsasnopais>. Acesso em: XXX. (Completar com o assunto da portaria e a data de acesso).

THOMAS, S. *et al.* Sustainable Rubber Nanocomposites: An Overview. **Green Chemistry**, v. 23, n. 4, p. 1564–1585, 2021. DOI: 10.1039/D0GC03994A.

9 ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO

I - Resumo do Plano de Trabalho;

II - Cronograma físico-financeiro do projeto;

III - Orçamento analítico previsto;

IV - Cotações comerciais;

V - Currículo dos coordenadores em formato .pdf;

VI - Lista de bens, produtos e estudos com previsão de transferência;

VII - Propostas técnicas e comerciais dos terceirizados que irão participar do projeto;

VIII - Declaração de observância