UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Ana Flávia Vieira Gomes

Desafios e oportunidades no gerenciamento de dormentes de madeira ao fim da vida útil

Juiz de Fora
2026

Ana Flávia Vieira Gomes

Desafios e oportunidades no gerenciamento de dormentes de madeira ao fim da vida útil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito à obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em: 21 de agosto de 2026.

Orientadora: Profa. D.Sc. Júlia Castro Mendes

Juiz de Fora
2026

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração
automática da Biblioteca Universitária da UFJF,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Vieira Gomes, Ana Flávia.
Desafios e oportunidades no gerenciamento de dormentes de madeira ao fim da vida útil / Ana Flávia Vieira Gomes. -- 2026.
77 f. : il.

Orientadora: Júlia Castro Mendes
Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2026.

1. Dormentes ferroviários. 2. Resíduos de serviços de transporte. 3. Economia circular. 4. Valorização de resíduos. 5. Creosoto. I. Castro Mendes, Júlia, orient. II. Título.

Ana Flávia Vieira Gomes

Desafios e oportunidades no gerenciamento de dormentes de madeira ao fim da vida útil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em: 21 de agosto de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Profa. D.Sc. Júlia Castro Mendes – Orientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. D.Sc. Thiago Tepasse de Brum
Instituto SENAI de Tecnologia em Couro e Meio Ambiente

Profa. D.Sc. Isadora Alves Lovo Ismail
Universidade de Ribeirão Preto (Unaerp)

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANA FLÁVIA VIEIRA GOMES

Título: "Desafios e oportunidades no gerenciamento de dormentes de madeira ao fim da vida útil."

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em 21/08/2026

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Júlia Castro Mendes - Orientadora e Presidente da Banca
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Thiago Tepasse de Brum- Membro titular externo
Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profa. Dra. Isadora Alves Lovo Ismail - Membro titular externo
Universidade de Ribeirão Preto

Juiz de Fora, 24/08/2026.

Documento assinado eletronicamente por **Júlia Castro Mendes**, **Professor(a)**, em 24/08/2026, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Isadora Alves Lovo Ismail**, **Usuário Externo**, em 02/09/2026, às 17:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **3167914** e o código CRC **4F13020E**.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio e à colaboração de pessoas e instituições às quais expresso minha mais profunda gratidão.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me conceder força, sabedoria e serenidade ao longo desta caminhada. Sua presença foi um alicerce constante nos momentos de desafio e superação.

Agradeço profundamente à minha orientadora, Profª Dra. Júlia Castro Mendes, da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), por sua orientação atenta, dedicação e incentivo contínuo durante todas as etapas desta pesquisa. Sua experiência e generosidade em compartilhar conhecimentos foram essenciais para a concretização deste trabalho.

Registro também minha sincera gratidão à MRS Logística, pela parceria fundamental, pelo suporte técnico, apoio financeiro e viabilização das visitas técnicas que enriqueceram a construção desta pesquisa, aproximando teoria e prática.

Estendo meus agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro concedido, que foi indispensável para a dedicação e desenvolvimento deste estudo.

Aos colegas de mestrado, agradeço pela parceria, pelo compartilhamento de aprendizados e pelo apoio mútuo ao longo desta trajetória acadêmica.

À minha família, minha base e inspiração, deixo meu carinho e reconhecimento. Em especial, à minha mãe, por sua dedicação incansável, amor incondicional e por ser minha maior incentivadora todos os dias. Ao meu pai, que, mesmo ausente fisicamente, sempre foi e continua sendo uma fonte inesgotável de motivação e exemplo de perseverança nos estudos e na vida. A presença dele em minha memória e em meu coração me acompanhou em cada passo desta jornada.

A todos vocês, meu mais sincero agradecimento.

Declaro que utilizei ferramentas de inteligência artificial apenas como apoio à revisão da redação e à organização do texto desta dissertação, permanecendo sob minha inteira responsabilidade todo o conteúdo, as análises, as interpretações e as conclusões apresentadas.

RESUMO

O modal ferroviário desempenha papel estratégico na matriz de transporte nacional, movimentando grandes volumes de cargas e contribuindo para o desenvolvimento econômico do país. Entretanto, a gestão dos resíduos gerados pelas atividades de manutenção ferroviária representa um desafio ambiental e logístico. Entre esses resíduos, destacam-se os dormentes de madeira descartados ao final de sua vida útil, que podem ser enquadrados como resíduos de serviço de transporte. Quando tratados com preservantes perigosos, como o creosoto, apresentam riscos de incêndio e contaminação ambiental. Além disso, a falta de padronização, a triagem ineficiente e os custos de transporte dificultam o seu escoamento. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi de identificar e desenvolver estratégias para a valorização de dormentes de madeira descartados, visando ampliar seu reaproveitamento e promover benefícios ambientais e econômicos para as concessionárias ferroviárias. A pesquisa, de caráter exploratório e descritivo, compreendeu levantamento bibliográfico, análise documental, visitas técnicas, entrevistas com profissionais do setor e avaliação de alternativas de valorização. Foram estruturadas três estratégias de valorização: aprimoramento da gestão logística; processamento de madeira para produção de biomassa; e reciclagem para fabricação de novos dormentes via madeira laminada colada ou compósitos. Para o estudo de caso, realizado em uma concessionária da região Sudeste do Brasil, foi selecionada a estratégia de aprimoramento logístico, devido a menor barreira técnica de implantação. A empresa possui 23 pátios de armazenamento, com volumes entre 1 e 667 m³. Após o levantamento dos dados operacionais, foram definidos cinco centros de consolidação e desenvolvido um modelo de Programação Linear via método Simplex no Excel, para minimizar custos de transporte. Os centros propostos permitiram concentrar volumes entre 173 e 931m³, reduzindo a dispersão dos materiais e favorecendo a formação de lotes para comercialização, controle de estoque e rastreabilidade. Os resultados demonstraram que melhorias na gestão logística podem constituir uma estratégia de valorização viável, contribuindo para reduzir os entraves associados ao armazenamento e à destinação dos dormentes descartados.

Palavras-chaves: Dormentes ferroviários; Valorização de resíduos; Creosoto; Reciclagem da madeira; Economia circular; Resíduos de Serviços de Transporte.

ABSTRACT

Rail transport plays a strategic role in the national transport matrix, moving large volumes of cargo and contributing to the country's economic development. However, managing waste generated by railway maintenance activities poses both environmental and logistical challenges. Prominent among these waste materials are wooden sleepers discarded at the end of their service life, which can be classified as transport service waste. When treated with hazardous preservatives such as creosote, they present risks of fire and environmental contamination. Furthermore, a lack of standardization, inefficient sorting, and transportation costs hinder their disposal and utilization. In this context, the objective of this study was to identify and develop strategies for the valorization of discarded wooden sleepers, aiming to increase their reuse and generate environmental and economic benefits for railway operators. The research, which was exploratory and descriptive in nature, involved a literature review, document analysis, technical site visits, interviews with industry professionals, and an evaluation of valorization alternatives. Three valorization strategies were structured: improving logistics management; processing the wood to produce biomass; and recycling the material to manufacture new sleepers using glued laminated timber or composites. For the case study, conducted at a railway operator in Southeastern Brazil, the logistics improvement strategy was selected due to its lower technical implementation barrier. The company operates 23 storage yards with inventory volumes ranging from 1 to 667 m³. After gathering operational data, five consolidation centers were defined, and a Linear Programming model using the Simplex method in Excel was developed to minimize transportation costs. The proposed centers enabled the consolidation of volumes ranging from 173 to 931 m³, thereby reducing material dispersion and facilitating the formation of batches for commercialization, inventory control, and traceability. The results demonstrated that improvements in logistics management can constitute a viable value-enhancement strategy, contributing to the reduction of obstacles associated with the storage and disposal of discarded sleepers.

Keywords: Railway sleepers, Waste valorization, Creosote, Wood recycling, Circular economy, Transport Service Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura ferroviária (via permanente).....17
Figura 2 - Esquema do conjunto roda-eixo e sua interação com os trilhos, dormentes e bitola.....19
Figura 3 - Lastro e sublastro ferroviário.....20
Figura 4 - Sistema de fixação elástico de superestrutura ferroviária.....21
Figura 5 - Dormente danificado e afundamento da via, causando desalinhamento dos trilhos.....22
Figura 6 - Dormentes de madeira na linha férrea.....24
Figura 7 - Forma dos dormentes: (a) Serrado; (b) Semirroliços.....26
Figura 8 - Dormente de concreto.....29
Figura 9 - Dormente monobloco.....30
Figura 10 - Dormentes bi-blocos.....30
Figura 11 - Dormente de aço.....31
Figura 12 - Pátios de dormentes de madeira.....36
Figura 13 - Fluxograma da metodologia adotada, visando à valorização de dormentes de madeira descartados.....41
Figura 14 - Reaproveitamento de dormentes na confecção de móveis rústicos.....46
Figura 15 - Reaproveitamento de dormentes em elementos de paisagismo.....47
Figura 16 - Dormente MLC no final do processo produtivo.....48
Figura 17 - Dormentes descartados junto à via férrea (ilustração de um depósito na Ucrânia).....54
Figura 18 - Dormentes “lenhas”.....55
Figura 19 - Distribuição espacial dos pátios ferroviários na região Sudeste e respectivos volumes de dormentes descartados.....63
Figura 20 - Modelagem de otimização logística.....64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores mínimos de propriedades das madeiras para os dormentes.....25
Tabela 2 - Dimensões nominais do dormente serrado.....26
Tabela 3 - Dimensões nominais do dormente de duas faces.....27
Tabela 4 - Destinos finais dos dormentes por tipo de material conforme a revisão de literatura. 33
Tabela 5 - Matriz de entrada modelo Simplex.....65
Tabela 6 - Função objetivo: volume x distância x custo 66
Tabela 7 - Decisão de alocação dos pátios de origem aos centros logísticos obtida pelo Solver (método Simplex) 67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Uso de dormentes de madeira na malha ferroviária brasileira 27
Quadro 2 - Diagnóstico dos desafios observados nas buscas *online*, visitas técnicas e entrevistas 58

SUMÁRIO

1 Introdução 13

1.1 Motivação e Relevância 13

1.2 Objetivo Geral 16

1.3 Objetivos Específicos 16

2 Revisão Bibliográfica 17

2.1 Estrutura ferroviária 17

2.1.1 Trilhos e Bitola 18

2.1.2 Lastro e sublastro 19

2.1.3 Fixações e acessórios 20

2.2 Dormentes 22

2.2.1 Dormentes de madeira 23

2.2.2 Dormentes de concreto 28

2.2.3 Dormentes de aço 31

2.2.4 Estratégias de gerenciamento de dormentes 32

2.3 Riscos associados ao descarte e armazenamento de dormentes de madeira..... 34

2.4 Economia circular 38

3 Metodologia 41

3.1 Revisão das alternativas existentes para A DESTINAÇÃO junto com levantamento das práticas globais 41

3.2 Visitas técnicas 42

3.3 Levantamento de alternativas para apresentar para a empresa parceira..... 43

3.4 Detalhamento das alternativas 44

4 Resultados e discussão 45

4.1 Destinos finais de dormentes segundo a literatura 45

4.1.1 Reuso de dormentes em móveis e paisagismo 46

4.1.2 Dormentes de Madeira Lamelada Colada (MLC) 48

4.1.3 Produção de compósitos com madeira reciclada 49

4.1.4 Aproveitamento energético como biomassa e gás NOTAR 50

4.1.5 Tratamentos químicos alternativos ao creosoto 52

4.2 Visitas técnicas 53

4.2.1 Visita à concessionária ferroviária - pátios de descarte 53

4.2.2 Visita à unidade compradora de dormentes - Barroso/MG 56

4.2.3 Discussão - Diagnóstico dos principais desafios na gestão de dormentes descartados 57

4.3 Estratégias de valorização dos dormentes 59

4.4 Detalhamento da rota de valorização selecionada em conjunto com a concessionária 62

4.4.1 Levantamento dos dados de operação 62

4.4.2 Definição dos centros de consolidação e modelagem logística 63

4.4.3 Potenciais contribuições da proposta 67

5 Conclusão 69

Referências 71

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA

O Brasil possui uma extensa malha ferroviária que desempenha um papel fundamental na economia, especialmente no transporte de cargas. Estima-se que o sistema ferroviário brasileiro se estenda por cerca de 31 mil quilômetros, sendo amplamente utilizado para o transporte de produtos agrícolas e minerais em todo o país (ANTF, 2024). Apesar de sua relevância estratégica, o setor ferroviário enfrenta desafios significativos associados ao descarte dos elementos da via permanente, como os dormentes, ao final de sua vida útil.

Os dormentes são elementos essenciais da superestrutura ferroviária, são instalados transversalmente aos trilhos, com a função de distribuir igualmente o peso dos trens dos trilhos para o lastro ao longo da via férrea. Tradicionalmente, são feitos de madeira, aço ou concreto, cada material apresentando vantagens e desvantagens específicas.

Os dormentes de madeira, por exemplo, oferecem vantagens como baixo custo inicial, facilidade de instalação e substituição, boa capacidade no amortecimento de vibrações, resiliência em casos de descarrilamento, baixo peso e isolamento elétrico natural (Steffler, 2013). Embora seu uso tenha diminuído em algumas regiões, devido ao avanço de materiais como o concreto e os polímeros reforçados, os dormentes de madeira ainda são amplamente empregados em diversas ferrovias ao redor do mundo, especialmente em linhas secundárias ou de baixa densidade de tráfego (Esveld, 2020; Ferdous *et al.*, 2015) No entanto, apresentam desvantagens consideráveis, como menor durabilidade às intempéries em comparação aos dormentes de concreto e aço, necessidade de tratamentos químicos para resistirem ao ataque de agentes biológicos, e degradação acelerada em ambientes úmidos ou de alto tráfego (Manalo, 2017).

Em razão de tais limitações, muitas concessionárias ferroviárias vêm promovendo a substituição gradativa dos dormentes de madeira pelos de concreto, que oferecem maior vida útil e menor demanda por manutenção (Manalo, 2017; Sadeghi, 2010). Ainda assim, os dormentes de madeira continuam sendo indispensáveis em algumas situações operacionais, como em linhas secundárias,

trechos de difícil acesso ou em regiões que exigem maior flexibilidade da via permanente.

A quantidade de dormentes necessários para uma ferrovia convencional pode variar entre 1.390 e 1.667 unidades por quilômetro, dependendo da geometria da via e do espaçamento adotado (Vignali, 2024; Thompson *et al.*, 2022). Já a vida útil dos dormentes ferroviários de madeira, por sua vez, está condicionada ao tipo de madeira, aos tratamentos utilizados, as condições climáticas da região e a intensidade do tráfego ferroviário, podendo variar entre 5 e 35 anos (Rempelos, Preston e Blainey, 2020; Thompson *et al.*, 2022). Ao final desse período, os dormentes de madeira que não apresentam mais condições de utilização na via tornam-se resíduos e podem ser classificados como Resíduos de Serviços de Transporte (RST), categoria estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010). Conforme a legislação, os RST são aqueles gerados em portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários (BRASIL, 2010).

A destinação dos dormentes descartados constitui, portanto, um desafio ambiental e logístico. Atualmente, os dormentes descartados são armazenados em pátios até sua destinação final. O armazenamento prolongado desses dormentes em pátios representa um alto risco de incêndio em épocas de seca, devido à inflamabilidade da madeira e à necessidade de vastos espaços físicos (Manalo, 2017). Em locais abertos, é comum ainda a presença de animais peçonhentos, o que pode gerar questões de saúde aos ferroviários(as) e à população próxima (Steffler, 2013). Além disso, os dormentes de madeira são tratados quimicamente, muitas vezes com creosoto, que contêm compostos cancerígenos, tornando esse descarte ainda mais problemático (Marcotte *et al.*, 2014). Algumas formas de reaproveitamento mais conhecidas e utilizadas atualmente envolvem o uso em decoração, na construção civil e na indústria moveleira, e como biomassa para a geração de energia (Valente, 2015). Entretanto, para esses fins, os dormentes de madeira são vendidos a preços baixos, limitando aos compradores os dormentes de melhor estado.

O conceito de valorização de resíduos envolve transformar subprodutos em novos materiais ou produtos com maior valor agregado, utilizando soluções tecnológicas que se alinham aos princípios da sustentabilidade e da economia circular, sendo capazes de reduzir o impacto ambiental e gerar benefícios financeiros (Abbade, 2024). No setor ferroviário, no que diz respeito ao descarte dos dormentes,

esse conceito pode incluir a reciclagem e a extensão de sua vida útil por meio de tratamentos ou a sua reutilização em outros contextos (Ferdous *et al.*, 2015).

Por exemplo, Damasceno *et al.* (2017) destacam que a utilização de dormentes de madeira descartados como fonte de biomassa para cogeração de energia elétrica contribui para a mitigação de impactos ambientais. Orszulik (2015) reforça essa perspectiva ao avaliar a combinação de dormentes com carvão e palha para a produção de energia em caldeiras, resultando em emissões controladas e ampliando as aplicações de resíduos sólidos, como cinzas e escórias, que podem ser utilizados em terrenos industriais e agrícolas. Essa alternativa permite tanto a economia de combustíveis fósseis quanto uma solução ecologicamente adequada para o descarte da madeira (Orszulik, 2015).

No que se refere ao prolongamento da vida útil dos dormentes ou à sua reutilização como novos dormentes, diferentes abordagens têm sido estudadas. Icimoto (2018) investigou o uso de tecido de fibra de vidro como forma de aumentar a durabilidade dos dormentes. Carrasco *et al.* (2012) estudaram a possibilidade de empregá-los como base para compósitos laminados; e Ashori, Tabarsa e Amosi (2012) propuseram a criação de compósitos de madeira-cimento a partir dos dormentes reciclados.

Embora estudos anteriores tenham abordado aspectos relacionados à destinação de dormentes ferroviários descartados, observa-se que essas pesquisas apresentam enfoques específicos. Rempelos, Preston e Blainey (2020), por exemplo, abordam aspectos relacionados a diferentes materiais empregados na fabricação de dormentes e alternativas de destinação ao final da sua vida útil. Dolci, Rigamonti e Grosso (2020), por sua vez, acordam aspectos relacionados às alternativas de gestão e a destinação de resíduos ferroviários, incluindo a reciclagem e o aproveitamento energético. Esses estudos contribuem para a compreensão das possibilidades de gerenciamento dos dormentes descartados, mas não contemplam, de forma integrada, a análise das alternativas de valorização, os desafios observados na operação e a proposição de uma estratégia logística aplicada a um caso real.

Nesse cenário, o diferencial deste trabalho está na integração entre a revisão das diferentes rotas de valorização identificadas na literatura, o diagnóstico das condições práticas de gerenciamento dos dormentes descartados e o desenvolvimento de uma proposta de valorização fundamentada em dados

operacionais de uma concessionária ferroviária. O estudo é conduzido a partir de um caso real de uma concessionária ferroviária da região Sudeste do Brasil. Dessa forma, espera-se contribuir para a redução dos impactos ambientais associados ao descarte dos dormentes, bem como para a criação de benefícios econômicos para o setor ferroviário e para a sociedade.

1.2 OBJETIVO GERAL

Identificar e desenvolver estratégias para a valorização de dormentes ferroviários de madeira usados, com base em um estudo de caso real, visitas técnicas e análise da literatura especializada.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

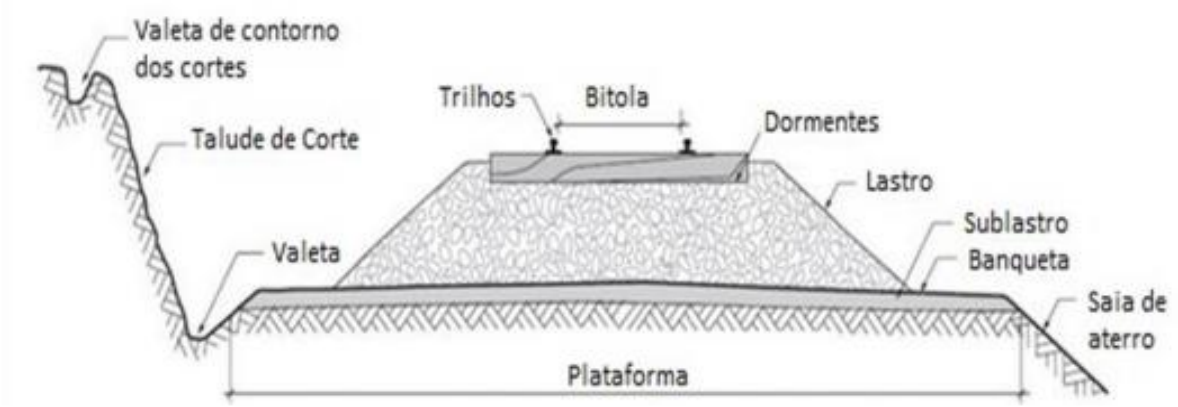
a) Analisar tecnologias e práticas viáveis de valorização dos dormentes de madeira, com foco em processos de reuso e reaproveitamento que possibilitassem prolongar sua vida útil e agregar valor, tomando como referência estudos de caso e literatura especializada.
b) Investigar iniciativas de economia circular adotadas por empresas do setor ferroviário, identificando práticas possíveis de adaptação à realidade da concessionária estudada, especialmente aquelas voltadas à reintegração dos dormentes ao ciclo produtivo e ao reaproveitamento sustentável do material descartado.
c) Propor uma rota estratégica para a valorização dos dormentes descartados pela concessionária estudada, através da definição de etapas operacionais e da avaliação de alternativas técnica, econômica e ambientalmente viáveis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTRUTURA FERROVIÁRIA

A ferrovia é usualmente composta por sistemas fixos (via permanente, edificações, sistemas elétricos e de sinalização) e pelo material rodante (trens e veículos de manutenção). A via permanente (Figura 1) refere-se ao conjunto de elementos e camadas que permitem a circulação dos trens. Ao longo dos séculos, desde o surgimento das ferrovias, seu design básico permaneceu quase inalterado, com evolução apenas em seus componentes, acompanhando o progresso das tecnologias de materiais.

Figura 1 - Estrutura ferroviária (via permanente)



Fonte: (Nabais, 2014).

A infraestrutura é constituída pela terraplenagem e todas as obras abaixo do greide de terraplenagem, o que inclui os taludes de corte e aterro, sistema de drenagem, obras de contenção e obras de arte especial. Já a superestrutura ferroviária é composta pelos elementos que se encontram acima da plataforma de terraplenagem e recebem os impactos diretos da carga do trem, estando sujeitos à ação de desgaste por causa da passagem do material rodante e das intempéries.

Com o avanço da tecnologia, houve um aumento na capacidade ferroviária de carga por eixo ao longo dos anos. No século XIX, os primeiros trens transportavam cerca de 5 a 8 toneladas por eixo, o que limitava tanto a capacidade quanto a eficiência do sistema (Campo Neto, 2015). Já no início do século XX, esse número evoluiu para cerca de 15 a 20 toneladas por eixo, refletindo melhorias nos trilhos, dormentes e no material rodante (Steffler, 2013). Atualmente, nas ferrovias modernas de carga, especialmente em países com infraestrutura avançada, é comum encontrar trens operando com 30 a 35 toneladas por eixo, podendo alcançar até 40 toneladas por eixo

em corredores dedicados ao transporte pesado, como observado nas ferrovias brasileiras utilizadas na mineração (ANTF, 2022). Essa evolução exigiu melhorias em todos os componentes da via permanente, de forma a garantir segurança, durabilidade e eficiência operacional.

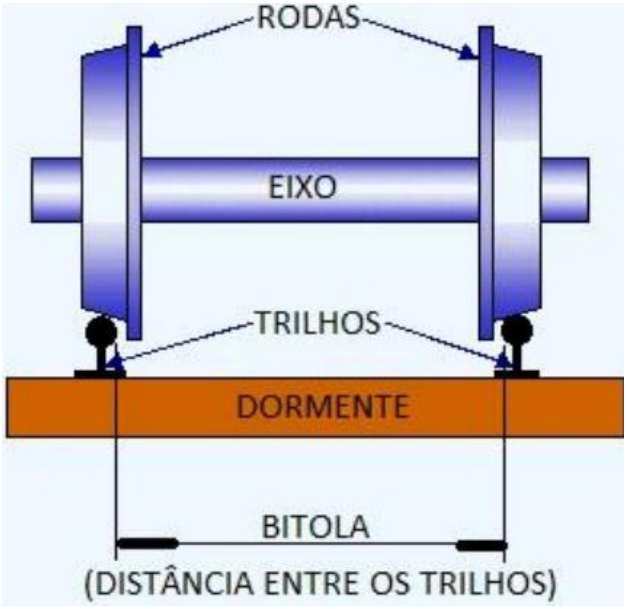
2.1.1 Trilhos e Bitola

Os trilhos são componentes essenciais do sistema ferroviário, projetados para suportar e guiar os trens ao longo de suas rotas. Em conjunto com os dormentes e o lastro, eles formam uma estrutura integrada que garante a estabilidade e segurança das operações. Constituídos por barras de aço dispostas paralelamente, os trilhos entram em contato direto com as rodas dos trens, distribuindo a carga uniformemente sobre os dormentes e reduzindo o atrito, o que permite uma movimentação segura e eficiente. O tipo de trilho mais utilizado atualmente no mundo, tanto em ferrovias de carga quanto de passageiros, é conhecido como trilho Vignole (Steffler, 2013). Esse trilho é caracterizado por sua seção transversal em forma de "T", que proporciona uma excelente resistência e estabilidade, permitindo a circulação de trens em altas velocidades e com maior segurança (Steffler, 2013).

Além de sua função estrutural, os trilhos ferroviários também desempenham um papel crucial na eficiência energética e na redução do impacto ambiental dos transportes. A escolha adequada dos materiais e a manutenção regular dos trilhos podem minimizar o atrito entre as rodas do trem e a superfície, resultando em menor consumo de combustível e emissão de poluentes (Carvalho e Silveira, 2022).

A bitola ferroviária, medida pela distância entre as faces internas dos trilhos, é um parâmetro técnico que influencia diretamente a estabilidade da via, a capacidade de carga e a velocidade operacional dos trens. Essa relação pode ser observada na Figura 2, que ilustra o conjunto composto pelas rodas, eixo, trilhos e dormentes, destacando a bitola como a distância entre trilhos. No Brasil, coexistem principalmente três bitolas: a métrica (1.000 mm), a padrão internacional (1.435 mm) e a larga (1.600 mm).

Figura 2 - Esquema do conjunto roda-eixo e sua interação com os trilhos, dormentes e bitola



Fonte: (Andrade, 2011)

A presença dessas diferentes medidas ao longo do território nacional reflete um processo histórico de desenvolvimento não padronizado do sistema ferroviário. De acordo com a Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF, 2022), “a malha ferroviária brasileira apresenta bitolas diferentes, o que inviabiliza a integração do sistema, além de provocar problemas logísticos e onerar o transporte”. A ausência de padronização entre as linhas exige operações de transbordo em pontos de encontro entre bitolas incompatíveis, o que acarreta aumento de custos operacionais e tempo de deslocamento. Ainda segundo a ANTF (2022), essas limitações estruturais comprometem a eficiência do modal ferroviário brasileiro e evidenciam a necessidade de investimentos voltados à interoperabilidade entre sistemas. Assim, a busca por soluções como a uniformização progressiva das bitolas ou o uso de tecnologias adaptativas é considerada essencial para ampliar a competitividade do setor.

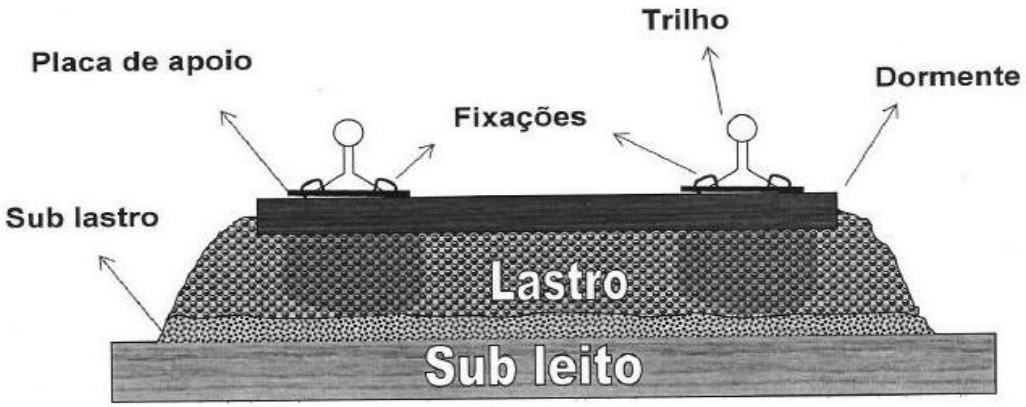
2.1.2 Lastro e sublastro

O lastro ferroviário é um elemento essencial da infraestrutura ferroviária, composto principalmente por rochas britadas, cuja função é garantir a estabilidade, o suporte adequado aos trilhos, transferir os esforços dos trilhos para o sublastro e

garantir a drenagem da via (Guo *et al.*, 2022). O lastro também desempenha um papel na proteção ambiental, minimizando a erosão do solo e reduzindo o impacto acústico nas áreas ao redor das vias (Guo *et al.*, 2022). A manutenção adequada desse componente é vital para assegurar a segurança dos passageiros e a integridade das cargas transportadas.

O sublastro é a camada localizada entre o lastro e o subleito, composta geralmente por materiais granulares. Suas principais funções incluem aumentar a capacidade de suporte da via, impedir a penetração do lastro no subleito e melhorar a resistência da base à erosão e à infiltração de água (Nabais, 2015). Normalmente, o sublastro é constituído por agregados mais acessíveis e econômicos, com especificações técnicas menos rigorosas em comparação às do lastro (Nabais, 2015). A Figura 3 ilustra a camada de lastro e sublastro da estrutura ferroviária.

Figura 3 - Lastro e sublastro ferroviário

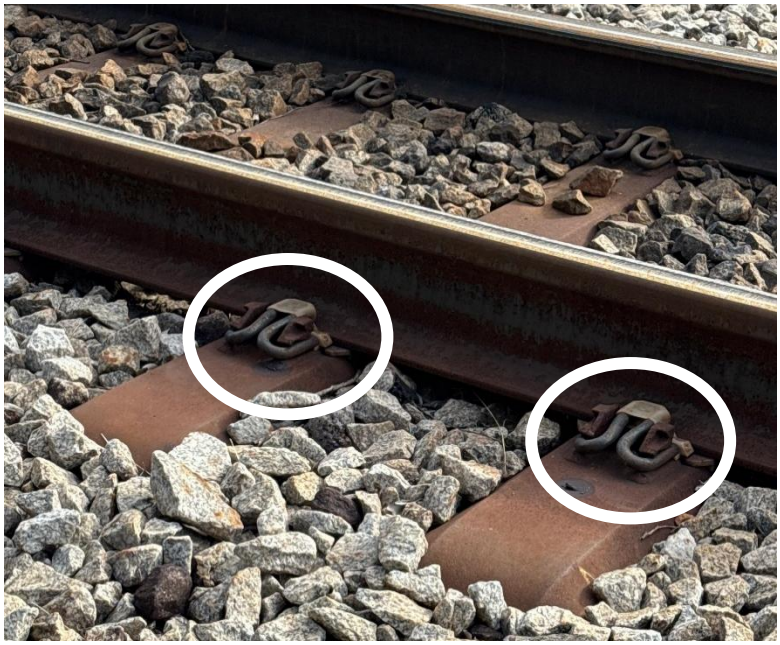


Fonte: (DNIT, 2019)

2.1.3 Fixações e acessórios

Os sistemas de fixação (Figura 4) conectam os trilhos aos dormentes, resistindo a possíveis deslocamentos e garantindo a manutenção correta da bitola, ou seja, da distância entre os dois trilhos da ferrovia, preservando o alinhamento e a segurança da via. Além disso, as fixações desempenham a função de resistir aos esforços verticais, transversais e longitudinais gerados pelo tráfego de trens e pelas variações de temperatura no trilho.

Figura 4 - Sistema de fixação elástico de superestrutura ferroviária



Fonte: Autora (2026)

As fixações, de modo geral, são classificadas em rígidas e elásticas. As fixações rígidas, embora mais simples, apresentam menor eficiência, sendo compostas por elementos como pregos e parafusos de linha (Esveld, 2001). Em contrapartida, as fixações elásticas, mais modernas, oferecem a capacidade de absorver impactos e vibrações, mantendo a pressão de fixação de forma constante (Steffler, 2013).

Falhas nas fixações dos trilhos podem resultar em acidentes graves, especialmente em seções curvas, onde as forças laterais aumentam a tensão sobre os trilhos (Chandran *et al.*, 2021). Esse risco destaca a necessidade crucial de inspeções regulares e abrangentes para avaliar a condição desses componentes essenciais. Tradicionalmente, essas inspeções são geralmente feitas visualmente, com inspetores caminhando ao longo da ferrovia e verificando cada fixação em busca de desgaste ou danos. No entanto, muitas ferrovias modernas têm adotado veículos de inspeção especializados que utilizam ferramentas sofisticadas e técnicas de aprendizado de máquina (Chandran *et al.*, 2021). Com essas tecnologias, as concessionárias ferroviárias podem garantir a segurança e a confiabilidade da rede, além de otimizar os cronogramas de manutenção e reduzir interrupções operacionais (Chandran *et al.*, 2021).

2.2 DORMENTES

As peças dispostas transversalmente, responsáveis por sustentar a parte superior da via e transmitir o peso, os impactos e as vibrações do trilho para o lastro são chamados de dormentes ou travessas (Profillidis, 2014). Esses elementos têm a função de amortecer os impactos e transferi-los ao lastro e sublastro, assegurando a segurança no transporte de passageiros e cargas (Profillidis, 2014). Os dormentes desempenham um papel fundamental na infraestrutura ferroviária, sendo responsáveis por manter a bitola, além de garantir a inclinação correta dos trilhos (Profillidis, 2014). Adicionalmente, eles são essenciais para promover a estabilidade lateral e longitudinal da via permanente, assegurando o alinhamento e a segurança do sistema ferroviário (Hausberger, Cordes e Gschösser, 2023).

Falhas nos dormentes, como trincas, podridão, desgaste ou deformações, podem ocasionar sérios problemas operacionais, incluindo o desalinhamento dos trilhos, variações na bitola e o afundamento da via (Profillidis, 2014; Steffler, 2013). Essas condições comprometem a estabilidade e a segurança do sistema ferroviário, aumentando o risco de descarrilamentos e exigindo intervenções de manutenção corretiva imediatas. A Figura 5 ilustra um caso crítico de falha na infraestrutura ferroviária, evidenciando um dormente danificado que resultou no afundamento da via e no desalinhamento dos trilhos.

Figura 5 - Dormente danificado e afundamento da via, causando desalinhamento dos trilhos



Fonte: (BBC News, 2020)

Existem diversos tipos de dormentes, cada qual apresentando características específicas em relação à durabilidade, custo, desempenho e resistência mecânica. Historicamente, o dormente de madeira de lei predominava nas aplicações ferroviárias, devido à sua ampla disponibilidade e desempenho superior (Steffler, 2013). Contudo, com o avanço da tecnologia e o crescimento exponencial dos mercados globais, as madeiras de lei se tornaram escassas e as demandas por maior previsibilidade, eficiência e durabilidade nos materiais utilizados em ferrovias se intensificaram (Steffler, 2013). Assim, foram desenvolvidos os dormentes de aço e concreto (Steffler, 2013).

2.2.1 Dormentes de madeira

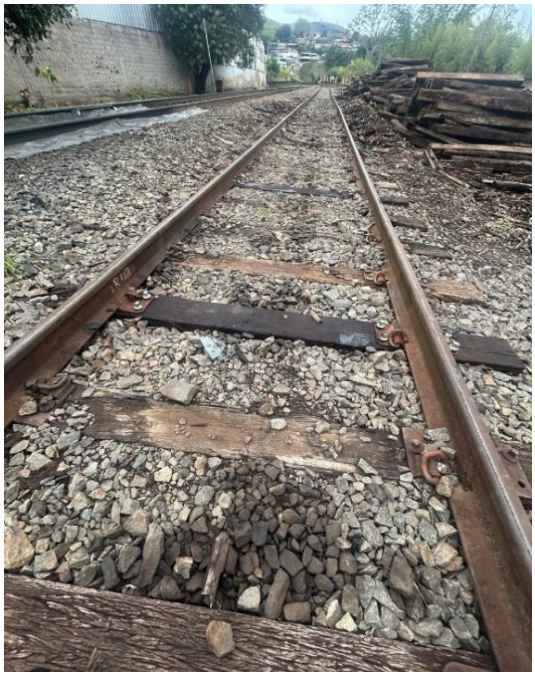
No Brasil, os primeiros dormentes de madeira foram utilizados em 1907, na construção da Estrada de Ferro Madeira-Mamoré, que foi concluída em 1912 (Paiva, 2016). Naquela época, eram empregadas madeiras nobres de árvores nativas da Floresta Amazônica, como o Jatobá (*Hymenaea courbaril*) e o Angelim Vermelho (*Dinizia excelsia*), devido à sua durabilidade e resistência (Vidal *et al.*, 2015). No entanto, com o avanço da legislação ambiental e a crescente escassez dessas espécies, o uso dessas madeiras para a fabricação de dormentes foi proibido (Vidal *et al.*, 2015).

Com a proibição do uso de madeiras nativas, surgiu a demanda por outras espécies que pudessem suprir essa necessidade. O eucalipto foi adotado nos últimos anos como uma alternativa devido à sua capacidade de produção rápida e em larga escala (Homa, 2013). Entretanto, para atender a requisitos específicos de durabilidade e resistência, algumas ferrovias têm recorrido à importação de madeiras como o carvalho, proveniente principalmente da Europa e da América do Norte, reconhecido por suas propriedades superiores, apesar do custo elevado e da dependência de fornecedores internacionais (Morrell, 2007).

Apesar das limitações técnicas e ambientais, os dormentes de madeira (Figura 6) permanecem relevantes no contexto ferroviário nacional, especialmente em função de suas propriedades mecânicas e da logística consolidada de sua utilização (Steffler, 2013). A continuidade de seu uso nas operações ferroviárias brasileiras reflete tanto aspectos econômicos quanto estruturais das concessionárias, que frequentemente

conciliam dormentes de madeira e concreto em diferentes trechos da malha (Hausberger, Cordes e Gschösser, 2023) (Steffler, 2013).

Figura 6 - Dormentes de madeira na linha férrea



Fonte: Autora (2026).

A NBR 7511, “Dormentes de madeira: Requisitos e métodos de ensaio” (2013), estabelece os principais critérios para os dormentes de madeira utilizados em vias férreas. Segundo a norma brasileira, os dormentes devem ser fabricados a partir de árvores adultas, isenta de contaminações por fungos, bactérias ou qualquer tipo de carbonização. A madeira utilizada deve pertencer, no mínimo, à classe de resistência C25 (ABNT, 2013).

Os dormentes de madeira são classificados em primeira e segunda classe, de acordo com as suas características físico-mecânicas. Para dormentes de madeira serrada, a densidade de massa aparente mínima exigida é de 750 kg/m³ para a primeira classe e 600 kg/m³ para a segunda classe (ABNT, 2013). A Tabela 1 apresenta os requisitos mínimos de desempenho estabelecido pela NBR 7511 (ABNT, 2013).

Tabela 1 - Valores mínimos de propriedades das madeiras para os dormentes

Propriedade	Valor		Método de verificação
	Primeira classe	Segunda classe	
Módulo de elasticidade à flexão	13.000 MPa	10.000 MPa	Anexo A[1]
Módulo de ruptura à flexão	50 MPa	40 MPa	Anexo A[1]
Compressão normal	5 MPa	4 MPa	Anexo B[1]
Resistência ao arrancamento lateral	10 kN	8 kN	Anexo D[1]
Resistência ao arrancamento normal	25 kN	20 kN	Anexo C[1]
Dureza *Janka*	40 MPa	35 MPa	Anexo E[1]

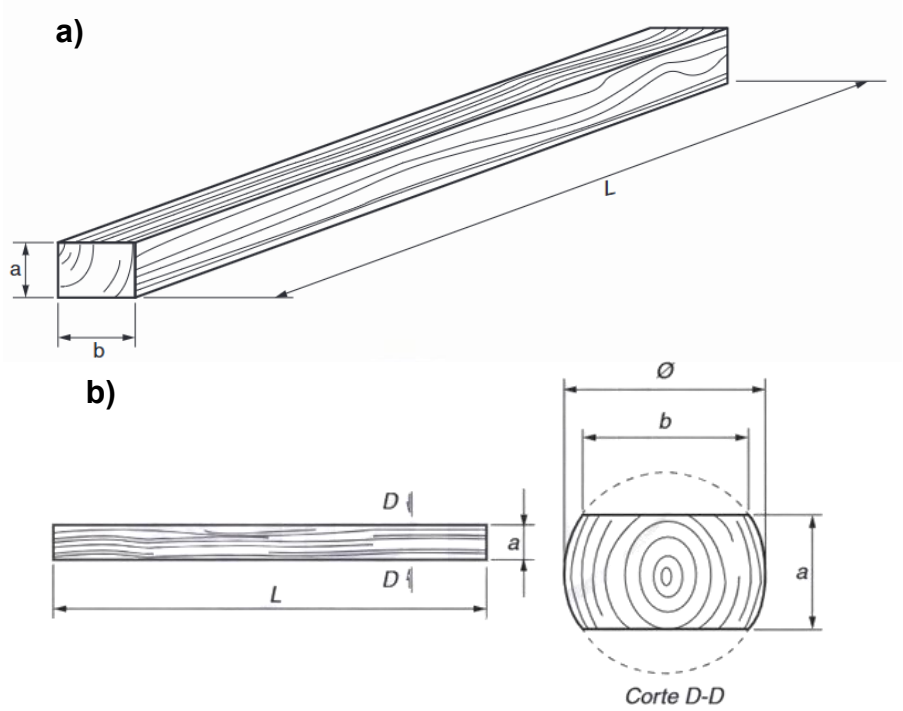
Nota: [1]Anexos da NBR 7511 (ABNT, 2013).

Fonte: NBR 7511 (2013), adaptado.

A American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA, 2021), associação técnica de referência no setor ferroviário norte-americano, também estabelece requisitos específicos para dormentes de madeira em seu Manual de Engenharia Ferroviária. Conforme suas diretrizes, os dormentes devem ser produzidos a partir de madeiras duras, submetidas a tratamento sob pressão com conservantes, visando a proteção contra insetos e fungos e, consequentemente, a ampliação da durabilidade dos materiais. A AREMA também define dimensões padrão mínimas para dormentes utilizados em vias principais e ramais, além de estabelecer critérios rigorosos de qualidade, que incluem a exclusão de defeitos capazes de comprometer a resistência estrutural, tais como apodrecimento, rachaduras significativas e nós em excesso.

Com relação à geometria, os dormentes de madeira são classificados em dois tipos principais. O primeiro é o tipo serrado (ou prismático), que apresenta as faces serradas e arestas vivas (Figura 7a); o segundo é o tipo duas faces (ou semirroliços), que possui duas faces horizontais serradas e duas laterais abauladas (Figura 7b).

Figura 7 - Forma dos dormentes: (a) Serrado; (b) Semirroliços



Fonte: NBR 7511 (2013)

As dimensões nominais dos dois modelos de dormentes estão apresentadas nas Tabela 2 e Tabela 3. Para as ferrovias com bitola métrica e carga por eixo igual ou superior a 270 kN, a NBR 7511 (2013) recomenda o uso de dormentes serrados com dimensões de 24x17x230 cm. Já para dormentes de duas faces, sob as mesmas condições de bitola e carga, as dimensões indicadas são de 30x17x230 cm (ABNT, 2013).

Tabela 2 - Dimensões nominais do dormente serrado

Bitola (m)	Largura - b (cm)	Altura - a (cm)		Comprimento - L (cm)		
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
Métrica (1,000)	22	24	16	18	190	205
	22	26	16	19	220	235
Normal (1,435)	22	26	16	19	260	270
Larga (1,600)	24	26	17	19	260	285
Nota: Para uso das dimensões nominais, é recomendado verificar as características da via permanente.						

Fonte: NBR 7511 (2013).

Tabela 3 - Dimensões nominais do dormente de duas faces

Bitola (m)	Diâmetro - Ø (cm)	Altura - a (cm)	Comprimento - L (cm)
Métrica (1,000)	28	16^{+2}_{0}	200^{+5}
	30	17^{+2}_{0}	230^{+5}
Normal (1,435)	30	17^{+2}_{0}	265^{+5}
Larga (1,600)	30	17^{+2}_{0}	280^{+5}
Nota: Para dormente de duas faces (semirroliços), devem ser verificados somente a altura e comprimento			

NBR 7511 (2013).

No decorrer desta pesquisa, foi possível identificar, por meio da análise documental, visitas técnicas e entrevistas com profissionais do setor, os principais contextos nos quais os dormentes de madeira ainda são aplicados no Brasil. Observou-se que, mesmo diante do avanço de alternativas, os dormentes de madeira tratados com creosoto continuam sendo largamente empregados em diversas situações operacionais, com destaque para linhas secundárias, pátios de manobra e intervenções temporárias de manutenção.

Para sistematizar essas informações, o Quadro 1 apresenta as principais estratégias de uso atual dos dormentes de madeira na malha ferroviária brasileira, considerando as referências técnicas consultadas, suas respectivas vantagens e desvantagens no contexto nacional, e uma breve descrição técnica de sua aplicação.

Quadro 1 - Uso de dormentes de madeira na malha ferroviária brasileira

Estratégia de uso	**Vantagens / Desvantagens no contexto brasileiro**	**Descrição técnica**
Uso em linhas principais (tráfego intenso)	✅ Vantagem: alto desempenho mecânico; tradição de uso ❌ Desvantagem: menor durabilidade frente a dormentes de concreto e maior necessidade de manutenção periódica	Empregados em trechos onde a demanda técnica exige resistência mecânica e absorção de impacto. Exigem constante monitoramento quanto a fissuras, ataque biológico e perda de rigidez longitudinal.
Uso em linhas secundárias e ramais industriais	✅ Vantagem: aproveitamento de dormentes já usados ❌ Desvantagem: menor controle técnico e maior incidência de falhas	Prática comum nas ferrovias brasileiras. Dormentes retirados de linhas principais são reaproveitados em pátios ou linhas auxiliares com menor tráfego, após triagem visual e testes básicos.

Estratégia de uso	Vantagens / Desvantagens no contexto brasileiro	Descrição técnica
Uso em desvios e pátios de manobra	✅ Vantagem: reutilização econômica de materiais ❌ Desvantagem: risco de acidentes se os dormentes estiverem muito degradados	A reutilização inclui dormentes retirados de outras áreas e é feita com critérios menos rigorosos que nas linhas principais. Esses dormentes são frequentemente utilizados em áreas com velocidade reduzida e baixa frequência de tráfego.
Reposição pontual (manutenção corretiva)	✅ Vantagem: extensão do ciclo de vida útil; baixo custo ❌ Desvantagem: exige logística constante de inspeção e substituição individual	Os dormentes de madeira são empregados em substituições de regiões pontuais quando o estoque de concreto não está disponível, especialmente em trechos com geometria complexa ou suporte limitado.
Uso em travessias temporárias ou obras de manutenção	✅ Vantagem: rapidez de instalação ❌ Desvantagem: exposição ao tráfego rodoviário pode acelerar a degradação	Utilizados temporariamente em obras de recuperação de via, travessias ou passagens de nível provisórias. Após o uso, são geralmente encaminhados para reaproveitamento em ramais.

Fonte: (ABNT, 2013); (ANTT, 2021); Observação em visitas técnicas (2024).

2.2.2 Dormentes de concreto

Os dormentes de concreto (Figura 8) são componentes essenciais da infraestrutura ferroviária, oferecendo vantagens sobre a madeira devido à sua durabilidade e resistência às intempéries (Profillidis, 2014). Além disso, sua capacidade de suportar cargas pesadas e a menor necessidade de manutenção contribuem para a eficiência operacional das ferrovias. Enquanto os dormentes de madeira pesam, em média, entre 60 e 80 kg, os de concreto chegam a pesar de 250 a 300 kg, além de apresentarem resistência à compressão entre 40 e 60 MPa e resistência à flexão superior a 5 MPa, o que os torna mais adequados para suportar altas cargas por eixo, superiores a 30 toneladas (Hausberger, Cordes e Gschösser, 2023) (Dolci, Rigamonti e Grosso, 2020) (AREMA, 2021). A vida útil dos dormentes de concreto pode variar entre 25 e 40 anos (Hausberger, Cordes e Gschösser, 2023; Dolci, Rigamonti e Grosso, 2020).

Figura 8 - Dormente de concreto



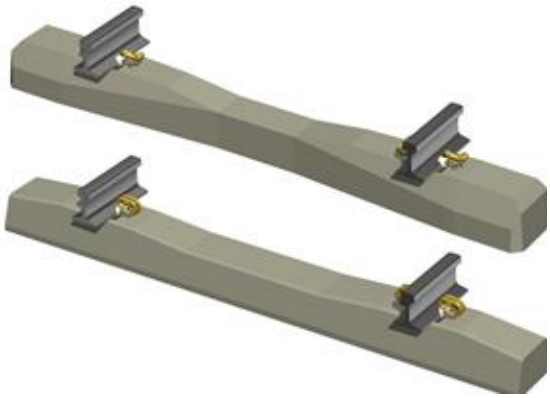
Fonte: (Wasaki Engenharia, 2024)

Segundo Bastos (1999), os primeiros dormentes de concreto armado foram projetados com seção constante, visando imitar o comportamento dos dormentes de madeira. No entanto, devido às características do concreto em termos de moldabilidade e de propriedades mecânicas, essa abordagem foi substituída por *layouts* mais eficazes (Bastos, 1999).

Sendo assim, dormentes de concreto armado atuais podem ser classificados em duas categorias principais. A primeira inclui os dormentes monoblocos (Figura 9) que consistem em uma única peça de concreto armado ou protendido resistente simultaneamente às tensões de compressão, cisalhamento e flexão (Dolci, Rigamonti e Grosso, 2020) (Hausberger, Cordes e Gschösser, 2023). Já os bi-blocos (Figura 10), nos quais o concreto está presente apenas nas áreas de apoio, absorvendo as tensões de compressão e cisalhamento geradas pelos trilhos, enquanto o aço é responsável por suportar a flexão do conjunto (Dolci, Rigamonti e Grosso, 2020).

Em grande parte das aplicações modernas, esses dormentes são produzidos com concreto protendido, no qual cabos de aço são tensionados antes ou após a moldagem (Dolci, Rigamonti e Grosso, 2020; Hausberger, Cordes e Gschösser, 2023). Essa técnica melhora a resistência à flexão, controla fissuras e aumenta a durabilidade, especialmente em trechos com altas cargas por eixo, vibrações ou variações térmicas (Hausberger, Cordes e Gschösser, 2023).

Figura 9 - Dormente monobloco



Fonte: (Dorbrás, 2020)

Figura 10 - Dormentes bi-blocos



DNIT (2016)

Apesar das vantagens estruturais e da longa vida útil, os dormentes de concreto apresentam desafios significativos ao final do seu ciclo de vida. Quando descartados, passam a compor os chamados Resíduos de Serviço de Transportes (RST), cuja gestão no Brasil ainda é limitada e carece de políticas públicas específicas voltadas a resíduos ferroviários. Diferentemente dos resíduos sólidos urbanos, os dormentes de concreto possuem grandes dimensões, elevada massa e, em muitos casos, contêm armaduras metálicas que dificultam sua trituração e reaproveitamento (Hausberger, Cordes e Gschösser, 2023). Embora existam normas técnicas que regulamentam o manejo desse tipo de resíduo, a falta de aplicação efetiva e de infraestrutura adequada para triagem, processamento e destinação final agrava o problema, resultando, muitas vezes, em armazenamento prolongado em pátios operacionais ou em descarte inadequado (Steffler, 2013). Além disso, dado o peso destes elementos, o transporte dos dormentes até centros de reciclagem autorizados é oneroso e logisticamente complexo, especialmente em regiões afastadas dos grandes centros urbanos (Profillidis, 2014). Assim, a falta de uma estratégia nacional coordenada para o descarte e reaproveitamento dos dormentes de concreto representa um entrave à sustentabilidade do setor ferroviário e reforça a necessidade de soluções alinhadas à economia circular (Dolci, Rigamonti e Grosso, 2020) (Profillidis, 2014) (Hausberger, Cordes e Gschösser, 2023).

2.2.3 Dormentes de aço

Os dormentes de aço (Figura 11) são constituídos por uma chapa laminada com espessura geralmente entre 8 e 14 mm, em formato de U invertido, com extremidades curvadas para formar garras que se fixam no lastro, contribuindo para a resistência ao deslocamento transversal da via (Brina, 1988). Este tipo de dormente pesa aproximadamente 70 kg, sendo mais leve que o dormente de madeira, o que facilita seu manuseio e armazenamento.

Figura 11 - Dormente de aço



Fonte: (UFSC, 2014)

Os dormentes de aço oferecem vantagens como excelente resistência mecânica e boa estabilidade no lastro, necessitando de menos manutenção em comparação a outros tipos de dormentes (Rempelos, Preston e Blainey, 2020). Sua vida útil varia de 17 a 40 anos (Rempelos, Preston e Blainey, 2020). Outra vantagem significativa é a possibilidade de reciclagem completa ao fim de sua vida útil. Contudo, alguns dos principais desafios enfrentados pelos dormentes de aço são a baixa resistência à oxidação e aos ataques químicos, alta condutividade elétrica, fissuração na região de assento do trilho, alto custo de aquisição e problemas com a compactação dentro do lastro (Cope e Ellis, 2001; Ferdous *et al.*, 2015; Steffler, 2013).

Devido a essas limitações, o uso de dormentes de aço é menos comum no mundo, se comparado aos dormentes de madeira e concreto (Steffler, 2013). Eles são mais indicados para ramais ferroviários secundários, onde a densidade de tráfego e a velocidade operacional são menores (Shang, Song e Ou, 2009). Na Austrália, país que

se destaca no desenvolvimento de tecnologias e estudos sobre dormentes de aço, este tipo representa apenas 13% do total de dormentes instalados (Manalo, 2017).

2.2.4 Estratégias de gerenciamento de dormentes

Nesta seção, foram analisados exclusivamente 15 artigos selecionados da literatura, a partir dos quais foi possível identificar, conforme apresentado na Tabela 4, os principais tipos de dormentes utilizados e as formas mais recorrentes de destinação ao final de sua vida útil. Os artigos foram selecionados através de buscas nas bases de dados científicas Scopus, Science Direct e Google Scholar. Foram utilizadas palavras-chaves específicas, como “reuse”, “railway sleepers”, “railroad tie”, “wooden”, “concrete” “steel” e “life cycle”, aplicadas ao título, resumo ou palavras-chave. Apenas artigos publicados entre 2015 e 2025 foram considerados, resultando em um total inicial de 42 trabalhos. Posteriormente, os artigos foram triados com base nos critérios de seleção que priorizam estudos abordando a avaliação do ciclo de vida da infraestrutura ferroviária e de gestão de resíduos de dormentes. Estudos duplicados e publicações sem dados relevantes foram excluídos. Após essa filtragem, foram selecionados os 15 artigos que foram organizados e analisados de acordo com o destino final dos dormentes. Ressalta-se que um mesmo artigo poderia abordar simultaneamente um, dois ou três tipos de materiais de dormentes e apresentar diferentes alternativas de destinação para cada material.

Entre os dormentes de madeira, a incineração se destaca como a alternativa mais mencionada (43%), refletindo a demanda por bioenergia. A reutilização é citada em 29% dos estudos, geralmente em aplicações secundárias, como cercas, estruturas temporárias ou mobiliário urbano. Já o descarte em aterros sanitários, apontado por 14% das fontes, é considerado uma prática preocupante devido ao potencial impacto ambiental negativo.

Tabela 4 - Destinos finais dos dormentes por tipo de material conforme a revisão de literatura.

Destino	Dormentes de Madeira	Dormentes de Concreto	Dormentes de Aço
Incineração	43% (3)	–	–
Reutilização	29% (2)	–	–
Aterro	14% (1)	31% (6)	–
Reciclagem	-	53% (10)	100% (1)
Não mencionado	14% (1)	16% (3)	–

Nota: Essa proporção é em relação aos documentos analisados, não em relação à massa ou ao volume de resíduos gerados

Fonte: Autora (2026)

No caso dos dormentes de concreto, a reciclagem é a principal estratégia identificada (53%), com destaque para a britagem do material visando sua reutilização como agregado em obras civis e de infraestrutura viária. No entanto, 31% dos estudos ainda consideram o envio para aterros como destino, evidenciando obstáculos logísticos e econômicos à implementação de soluções mais sustentáveis. Outros 16% dos trabalhos analisados não abordam o destino final dos dormentes, o que pode resultar em subestimação dos impactos e oportunidades associados a essa etapa.

Quanto aos dormentes de aço, o cenário é mais positivo a reciclagem aparece como a única forma de destinação identificada na literatura, refletindo a consolidação dessa prática no setor. Além das implicações ambientais, as diferentes rotas de destinação dos dormentes também apresentam variações significativas nos custos envolvidos. O envio para aterros industriais, por exemplo, costuma representar a alternativa com menor investimento inicial (Rempelos, Preston e Blainey, 2020).

A incineração com aproveitamento energético, por sua vez, situa-se em uma faixa de custo intermediária (Dolci, Rigamonti e Grosso, 2020). Ainda assim, destaca-se pela capacidade de reduzir o volume de resíduos e pela geração de energia como subproduto (Dolci, Rigamonti e Grosso, 2020). No caso da reciclagem, os custos variam conforme o tipo de material: o concreto reciclado, por exemplo, enfrenta limitações logísticas e baixo valor de mercado como agregado (Vignali, 2024), enquanto o reaproveitamento do aço, frequentemente destinado à sucata, tende a ser economicamente mais atrativo (Vignali, 2024).

Já a reutilização de dormentes em fins secundários, como em cercas, mobiliário ou projetos de paisagismo é considerada uma alternativa de baixo custo operacional.

No entanto, seu uso é restringido por legislações específicas, especialmente no caso de dormentes tratados com produtos químicos preservantes (Damasceno *et al.*, 2017).

2.3 RISCOS ASSOCIADOS AO DESCARTE E ARMAZENAMENTO DE DORMENTES DE MADEIRA

O descarte e armazenamento de dormentes de madeira apresentam desafios complexos, principalmente quando tratados com conservantes químicos tóxicos. Os principais conservantes utilizados são o CCA (cobre-cromo-arsênio), o CCB (cromo-cobre-boro) e creosoto (Vidal *et al.*, 2015; ABNT, 2013). Classificados como resíduos perigosos, classe I da NBR 10004:2024 – “Resíduos sólidos — Classificação”, esses materiais possuem propriedades como inflamabilidade, toxicidade e potencial de lixiviação de substâncias contaminantes (ABNT, 2024).

O creosoto, um destilado obtido de alcatrão bruto pela carbonização da hulha, é amplamente utilizado no tratamento de dormentes de madeira (ABNT, 2013; Muzyka, Kozielska e Sajdak, 2024). Trata-se de uma substância oleosa, tóxica, incluindo mais de 85% de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), como naftaleno, antraceno, fenantreno, pireno, criseno e benzopireno - este último classificado como potencialmente cancerígeno, além de HAPs alquilados, compostos fenólicos e heterocíclicos contendo nitrogênio e enxofre (Muzyka, Kozielska e Sajdak, 2024; Icimoto, 2018).

A madeira saturada com esse óleo, quando descartada de forma inadequada em pilhas desordenadas às margens da ferrovia, em contato com o solo ou a água, representa sérios riscos ambientais por meio da lixiviação, sobretudo em áreas com lençol freático superficial (Marcotte *et al.*, 2014; Araújo, 2012). Além disso, o armazenamento prolongado dos dormentes tratados com creosoto em pátios ferroviários, sem controle adequado, eleva o risco de incêndios devido à inflamabilidade do conservante, além de provocar emissões atmosféricas nocivas e expor os trabalhadores a riscos ocupacionais (Marcotte *et al.*, 2014). Segundo a agência americana ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2022) a exposição prolongada a essa substância pode causar dermatites, lesões

respiratórias e efeitos tóxicos sistêmicos, exigindo controle rigoroso, exigindo o uso de EPIs específicos e procedimentos rigorosos de manuseio.

Ainda que os principais riscos estejam associados à presença de conservantes químicos, é importante ressaltar que os dormentes de madeira, mesmo quando não tratados com substâncias perigosas, podem representar riscos biológicos. Entre eles, destacam-se o abrigo de animais peçonhentos e a proliferação de fungos e insetos xilófagos (Kaewunruen, Lopes e Papaelias, 2018). Esses fatores reforçam a necessidade de gestão criteriosa e controle rigoroso mesmo em situações que, à primeira vista, possam parecer menos críticas.

Do ponto de vista econômico, a disposição inadequada dos dormentes gera custos elevados com logística reversa, ocupação de grandes áreas de armazenamento e eventual responsabilização legal (Lima, 2022). O descarte adequado de resíduos perigosos, em conformidade com as normas ambientais, pode representar até 20% do custo total ao longo do ciclo de vida do material, ou seja, desde a sua produção até o descarte final (Lima, 2022). Em contrapartida, a valorização como insumo energético ou matéria-prima secundária pode representar retorno financeiro e redução de custos operacionais, além agregar valor à imagem da empresa (KPMG, 2022).

Do ponto de vista logístico, a localização dispersa dos dormentes descartados, a escassez de janelas operacionais para retirada e a falta de padronização nos critérios de reaproveitamento dificultam a organização de uma cadeia eficiente de revalorização. Em muitos casos, os dormentes ficam estocados por longos períodos em pátios mal estruturados, o que contribui para a degradação do material e agravando os riscos ambientais. Para ilustrar essas questões, a Figura 12 mostra dormentes estocados no pátio interno de uma empresa ferroviária e em uma imagem de satélite do Google Maps. A ausência de cobertura e o longo tempo de exposição ao ambiente favorecem a degradação da madeira, o que não apenas inviabiliza sua possível reutilização, como também contribui para a formação de focos de contaminação e proliferação de vetores biológicos. E quanto pior a qualidade do dormente, mais tempo ele tende a ficar estocado, o que agrava a situação.

Figura 12 - Pátios de dormentes de madeira



Fonte: Google Maps (2025)



Fonte: (A pilha de dormentes é uma preocupação em relação ao veneno, 2008)

A PNRS, instituída pela Lei nº 12.305/2010 estabelece uma ordem de prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil, considerando sua origem e características (BRASIL, 2010). Entre as categorias definidas quanto à origem, encontram-se os Resíduos de Serviços de Transporte (RST), provenientes de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários (BRASIL, 2010). No setor ferroviário, esses resíduos podem ser gerados tanto pelas atividades operacionais quanto pelas ações de manutenção da infraestrutura, incluindo materiais e componentes substituídos da via permanente, como os dormentes ferroviários.

A PNRS orienta, ainda, a sociedade e os setores produtivos a adotar, de forma hierárquica, ações voltadas à não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e, somente em último caso, à disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010). Essa hierarquia direciona a adoção de estratégias que priorizem a prevenção da geração e o aproveitamento dos resíduos, restringindo a disposição final aos materiais que não apresentem alternativas técnica ou economicamente viáveis de recuperação.

No caso de resíduos que apresentem características de periculosidade, a PNRS estabelece requisitos específicos para seu gerenciamento. Os geradores de resíduos perigosos estão sujeitos à elaboração de um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), conforme os artigos 20 e 24 da Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010). Esse plano deve abranger o diagnóstico da geração, segregação, acondicionamento, armazenamento temporário, transporte, tratamento e disposição final, sempre de acordo com as normas técnicas da ABNT e com a legislação ambiental aplicável (BRASIL, 2010).

Nesse contexto, o armazenamento temporário de dormentes tratados com creosoto, classificados como resíduos perigosos, deve observar os princípios da Lei nº 12.305/2010 (PNRS), que exige que esse tipo de resíduo seja acondicionado de forma segura, conforme critérios técnicos reconhecidos. Entre as medidas de controle aplicáveis ao armazenamento temporário, destacam-se o uso de áreas com piso impermeável, contenção de efluentes, sinalização de risco, controle de acesso e medidas preventivas contra incêndios, conforme previsto em legislações ambientais vigentes e diretrizes operacionais adotadas por órgãos reguladores e concessionárias ferroviárias (ABNT, 2024).

Complementarmente, a Resolução RDC nº 661/2022 da ANVISA dispõe sobre as Boas Práticas de Gerenciamento dos Resíduos de Serviços de Saúde, mas seu escopo também se aplica a resíduos sólidos que possam representar risco à saúde pública ou ao meio ambiente, como os dormentes de madeira com creosoto. A norma estabelece diretrizes para o manejo, armazenamento e destinação final segura desses materiais, exigindo medidas que previnam a contaminação do solo, da água e da atmosfera, bem como a exposição ocupacional dos trabalhadores envolvidos no manuseio e transporte. Dessa forma, a resolução reforça a necessidade de infraestrutura adequada nos pátios ferroviários, com controle de acesso, sinalização de risco, impermeabilização do piso e contenção de efluentes, além da adoção de procedimentos de biossegurança e planos de contingência voltados à proteção da saúde humana e ambiental (ANVISA, 2022).

O transporte, por sua vez, está submetido à NBR 13221 (ABNT, 2017), que estabelece exigências relacionadas a embalagem adequada, rotulagem específica, documentação técnica e treinamento de pessoal envolvido no transporte de produtos perigosos. A negligência em qualquer uma dessas etapas pode configurar infrações previstas na Lei nº 9.605/1998 (Lei de Crimes Ambientais) e na Resolução ANTT nº 5.232/2016, que tratam das sanções ambientais e das penalidades aplicáveis ao transporte de produtos perigosos (Brasil, 1998; ANTT, 2016).

Além das obrigações legais, o gerenciamento responsável de dormentes está diretamente relacionado à reputação e ao desempenho institucional das empresas ferroviárias. Isso ocorre especialmente diante do avanço dos critérios ESG (Environmental, Social and Governance) nas avaliações de mercado, que consideram, no aspecto ambiental, a forma como as empresas tratam seus resíduos, reduzem

impactos e promovem a sustentabilidade. A adoção de práticas adequadas de gestão de dormentes não apenas diminui riscos ambientais e regulatórios, mas também demonstra comprometimento com responsabilidade social e boa governança, refletindo positivamente na imagem institucional e na atratividade frente a investidores e clientes. Nesse contexto, práticas sustentáveis na gestão de resíduos, como estratégias para a economia circular, podem favorecer o acesso a financiamentos verdes, incentivos fiscais e parcerias estratégicas (KPMG, 2022).

A partir da análise do PGRS da concessionária ferroviária parceira desta pesquisa, verificou-se que há diretrizes técnicas rigorosas voltadas ao controle dos dormentes de madeira tratados com creosoto. O documento prevê que o armazenamento temporário desses materiais deve ocorrer em áreas com piso impermeável, cobertura, bacias de contenção compatíveis com o volume armazenado, segregação por classe de risco, sinalização de segurança e acesso restrito. Também é exigida a caracterização prévia dos resíduos, e quando não identificados corretamente, estes devem ser tratados como Classe I, até que se prove o contrário. O transporte e a destinação desses resíduos requerem documentação específica, como Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR), Certificado de Destinação Final (CDF) e nota fiscal, garantindo rastreabilidade e conformidade legal. Além disso, o transporte externo só pode ser realizado por empresas homologadas e licenciadas, mediante inspeções rigorosas das condições dos veículos e cargas. O plano reforça ainda a importância de avaliar continuamente alternativas de redução, reutilização e reciclagem, alinhando-se aos princípios da economia circular e à minimização de impactos ambientais, sociais e econômicos.

2.4 ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular é um modelo de produção e consumo que visa manter os recursos em uso pelo maior tempo possível, extraindo deles o máximo valor antes de recuperar e regenerar produtos e materiais ao final de cada ciclo de vida (Foundation, 2013). Ao contrário do modelo linear tradicional, baseado em extração, transformação, uso e descarte, a economia circular propõe uma dinâmica regenerativa, em que o conceito de “resíduo” é substituído por “recurso” (Foundation, 2013).

Segundo Kirchherr *et al.* (2017), a economia circular transcende a mera gestão de resíduos, implicando transformações estruturais em toda a cadeia de valor, com ênfase na ecoeficiência, na inovação tecnológica, na durabilidade dos produtos e na reintegração sistemática dos materiais ao ciclo produtivo. Tal abordagem tem se consolidado internacionalmente como um dos pilares do desenvolvimento sustentável, sendo progressivamente incorporada por governos, instituições multilaterais e organizações empresariais. Nesse contexto, a recente publicação da norma ISO 59020:2024, que estabelece diretrizes para a mensuração e avaliação do desempenho em circularidade, reforça a necessidade de que essas práticas sejam implementadas de maneira estruturada, monitoradas e formalmente integradas aos processos organizacionais, conferindo maior rigor e consistência às estratégias de economia circular (ISO, 2024).

No contexto ferroviário, a aplicação desses princípios, especialmente na gestão de dormentes de madeira, representa uma oportunidade para reduzir passivos ambientais, a diminuição da exploração de recursos naturais e a geração de valor a partir de resíduos. A valorização de resíduos pode ocorrer por meio da reutilização, remanufatura, reciclagem ou recuperação energética, sempre com foco em prolongar o ciclo de vida útil dos recursos e minimizar a extração de matérias-primas virgens (Bocken *et al.*, 2016).

No caso dos dormentes de madeira, alternativas como reprocessamento químico, aproveitamento energético controlado, fabricação de compósitos ou aplicações com restrições específicas têm sido exploradas com sucesso (Damon *et al.*, 2011; Orszulik, 2015). Essas rotas de reaproveitamento não apenas evitam o descarte, como também geram valor agregado ao transformar um passivo ambiental em recurso estratégico.

Para viabilizar essas soluções, é essencial integração entre inovação tecnológica, regulação ambiental e economia circular. Isso significa repensar desde o projeto dos dormentes até sua destinação final, priorizando materiais renováveis, técnicas de reaproveitamento e parcerias intersetoriais que ampliem a cadeia de uso (Foundation, 2013).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia consolidada que permite analisar os impactos ambientais de um produto desde a extração das matérias-primas até sua destinação final (ABNT, 2009). No contexto dos dormentes

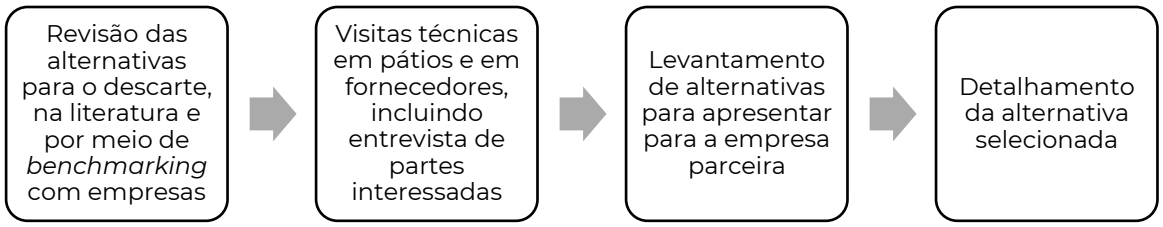
ferroviários, a ACV pode ser uma ferramenta estratégica para comparar as diferentes rotas de valorização com base em indicadores como emissões de CO_2, consumo de energia, toxicidade e uso do solo.

O estudo de Song *et al.* (2017), por exemplo, mostrou que, embora dormentes de madeira tenham menor impacto de produção em relação ao concreto e ao aço, o uso de creosoto compromete significativamente sua performance ambiental ao final da vida útil.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho consistiu em um estudo sobre a valorização de dormentes ferroviários de madeira usados, com foco na identificação de alternativas que promovam o reaproveitamento seguro e economicamente viável desses materiais, buscando minimizar os riscos ambientais e maximizar o retorno financeiro para a empresa parceira. A metodologia foi estruturada em quatro etapas principais, conforme apresentado no fluxograma da Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma da metodologia adotada, visando à valorização de dormentes de madeira descartados



Fonte: Autora (2026)

3.1 REVISÃO DAS ALTERNATIVAS EXISTENTES PARA A DESTINAÇÃO JUNTO COM LEVANTAMENTO DAS PRÁTICAS GLOBAIS

Inicialmente, foi conduzida uma revisão bibliográfica normativa e técnica, com o propósito de identificar e sistematizar as principais alternativas existentes para a destinação e o reaproveitamento de dormentes ferroviários, com ênfase nos dormentes de madeira, considerando experiências e práticas adotadas tanto no cenário nacional quanto internacional. Esta etapa contemplou o levantamento de artigos científicos, dissertações, teses, repositórios institucionais, relatórios técnicos e normas, utilizando as bases de dados Scopus, Google Acadêmico e SciELO, com enfoque nos impactos ambientais, sociais e econômicos associados às diferentes práticas de gestão de resíduos ferroviários.

Paralelamente à revisão da literatura, efetuou-se o levantamento e a análise das principais normativas vigentes que regem a destinação de resíduos ferroviários. Foram analisadas as resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), as normas emitidas pela Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários

(ANTF) e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), além de legislações ambientais internacionais, tais como as regulamentações da Environmental Protection Agency (EPA), dos Estados Unidos, e as diretrizes estabelecidas por órgãos da União Europeia.

Adicionalmente, foram examinadas experiências consolidadas em países que apresentam modelos sustentáveis de gestão de dormentes. Para isso, realizou-se uma pesquisa direcionada junto a empresas do setor ferroviário, nacionais e internacionais. A coleta de informações ocorreu principalmente por meio de buscas em sites institucionais, portais oficiais das empresas, relatórios públicos e outras fontes disponíveis na internet, incluindo bases de dados e documentos técnicos acessíveis. Dessa forma, foram obtidos conjuntos de dados que permitiram um levantamento qualitativo dos métodos atualmente adotados para a destinação e descarte de dormentes, abrangendo aspectos como os tipos de dormentes em uso, os procedimentos aplicados após sua retirada de serviço e os principais desafios operacionais e regulatórios enfrentados. A análise dessas práticas globais possibilitou uma abordagem comparativa, contribuindo para a identificação de estratégias com potencial de adaptação à realidade brasileira.

3.2 VISITAS TÉCNICAS

Com base nas informações teóricas levantadas, foram realizadas visitas técnicas entre outubro de 2024 e março de 2025 a diferentes pontos da cadeia de gestão de dormentes, com destaque para os pátios de armazenamento de uma concessionária ferroviária situada na região Sudeste do Brasil e para uma empresa atuante na compra, reaproveitamento e transporte desses materiais. A seleção dos locais visitados baseou-se em critérios de proximidade geográfica e permissão institucional de acesso.

As visitas foram conduzidas com apoio de roteiros semiestruturados de perguntas, elaborados de modo a orientar a coleta de informações de caráter técnico, operacional e comercial. As entrevistas buscaram compreender aspectos como a origem e o tipo de madeira empregada nos dormentes, os processos de tratamento preservativo, a vida útil média, os critérios de destinação e substituição, as rotas de

destinação adotadas e os principais desafios logísticos e ambientais envolvidos em cada etapa do ciclo de gestão.

No caso da concessionária ferroviária, as informações obtidas possibilitaram caracterizar os procedimentos adotados para a destinação dos dormentes de madeira, as formas de armazenamento temporário e as dificuldades associadas ao acúmulo de materiais, especialmente o risco de incêndio, a infestação por animais peçonhentos, os furtos e a ausência de segregação prévia. Já na empresa compradora, as entrevistas permitiram compreender o fluxo de aquisição, transporte e revenda dos dormentes, bem como a atuação de uma empresa do mesmo grupo econômico na transformação pontual desses materiais em produtos acabados, como escadas, pergolados, bases para fogão a lenha e peças estruturais. As questões direcionadas abordaram também a logística de coleta, a sazonalidade da demanda, o perfil dos clientes e os principais entraves comerciais enfrentados.

Essa etapa empírica mostrou-se fundamental para contextualizar a realidade operacional da empresa parceira, relacionar as práticas observadas aos fundamentos técnicos e normativos identificados na etapa anterior e evidenciar a complexidade logística, ambiental e comercial inerente à gestão sustentável dos dormentes ferroviários descartados. Além disso, a aplicação dos roteiros de entrevistas permitiu aprofundar a compreensão sobre as práticas de destinação e reaproveitamento, contribuindo para a identificação de oportunidades de melhoria e de potencial de inovação dentro da cadeia de valor analisada.

3.3 LEVANTAMENTO DE ALTERNATIVAS PARA APRESENTAR PARA A EMPRESA PARCEIRA

Com o objetivo de identificar alternativas para a valorização de dormentes ferroviários descartados, foi realizada uma análise qualitativa dos resultados obtidos na revisão da literatura, em visitas técnicas e na análise de experiências de outras concessionárias, tanto nacionais quanto internacionais. Essas alternativas foram selecionadas e agrupadas com base em sua relevância prática e no potencial de aplicação à realidade da empresa parceira, levando em conta aspectos como viabilidade técnica, impactos ambientais, custo-benefício e conformidade com a legislação vigente. Ao todo, foram estruturadas três estratégias de valorização, que

foram posteriormente apresentadas à concessionária ferroviária participante da pesquisa. O detalhamento de cada uma delas é apresentado na seção 4.3.

3.4 DETALHAMENTO DAS ALTERNATIVAS

A reunião de alinhamento com a empresa parceira desta pesquisa foi realizada em outubro de 2025. Nesse encontro as estratégias previamente estruturadas foram discutidas e avaliadas em conjunto com a concessionária, considerando as prioridades operacionais e estratégicas da empresa. O objetivo é que essa alternativa seja aprofundada em termos técnicos, operacionais e econômicos, visando sua posterior implementação ou adaptação.

A partir das discussões, definiu-se como objeto de aprofundamento a proposta de uma otimização logística voltada à gestão dos dormentes descartados. A proposta foi estruturada em quatro etapas. Na primeira etapa, foi feito um levantamento dos dados operacionais da concessionária, onde foram coletadas informações sobre a localização dos pátios de armazenamento, os volumes de dormentes disponíveis em cada unidade, as formas atualmente empregadas para destinação do material, os custos médios de transporte, a capacidade operacional disponível, além de informações relacionadas aos potenciais compradores. Esses dados foram disponibilizados pela concessionária e constituíram a base para a construção do modelo de otimização.

Na segunda etapa, foram definidos potenciais centros de consolidação para o recebimento dos dormentes provenientes dos diferentes pátios distribuídos na malha ferroviária. Foram escolhidos cinco pátios que passariam a atuar como centros de consolidação. A seleção considerou critérios como o volume histórico de armazenamento, a distribuição espacial dos pátios ao longo da ferrovia, a proximidade de mercados consumidores e a acessibilidade por meio da rodovia, a fim de reduzir a dispersão dos materiais.

Em seguida, na terceira etapa, foi desenvolvido um modelo de otimização baseado em Programação Linear. O objetivo foi de minimizar o custo total de transporte dos dormentes entre os pátios de origem e os centros de consolidação. A função objetivo considerou o custo logístico, o volume de dormentes de cada pátio (dado referente a outubro de 2025) e a distância rodoviária aproximada. Como

restrição, foi estabelecido que cada pátio de origem deveria ser associado apenas a um centro de consolidação, sendo essa decisão representada por variáveis binárias. O modelo foi implementado no Microsoft Excel por meio do suplemento “Solver” e resolvido utilizando o algoritmo Simplex para problemas lineares. A partir da solução obtida, foi determinada automaticamente a configuração logística que tem o menor custo total de transporte para a rede ferroviária.

Ressalta-se que o método Simplex foi escolhido porque a questão a ser resolvida trata-se de um problema de alocação, cuja estrutura pode ser representada por uma função objetivo linear e restrições lineares. Além disso, o problema possui dimensão relativamente pequena. Métodos como o Problema do Caixeiro-Viajante não foram empregados, porque são indicados para situações em que se busca determinar a sequência ótima de visita a diversos pontos, ou seja, uma rota de transporte entre múltiplos pátios. Neste estudo, o objetivo consiste apenas em definir para qual centro logístico cada pátio deve encaminhar seus dormentes.

Por fim, na última etapa, foi feita uma análise dos resultados encontrados, que foi novamente apresentada à empresa parceira na conclusão do projeto. A avaliação se concentrou no potencial de redução das distâncias de transporte, na concentração dos volumes de dormentes nos centros logísticos, na rastreabilidade dos materiais e na criação de condições mais favoráveis para sua comercialização.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DESTINOS FINAIS DE DORMENTES SEGUNDO A LITERATURA

A valorização de dormentes ferroviários usados tem se mostrado uma temática central diante dos desafios ambientais, econômicos e operacionais enfrentados pelas concessionárias ferroviárias. A literatura especializada aponta diversas rotas tecnológicas para o aproveitamento desses materiais, com destaque para a reciclagem, o reuso e o aproveitamento energético, estruturadas sob os princípios da economia circular. Embora apresentem potencial significativo, tais alternativas ainda enfrentam barreiras técnicas, logísticas e regulatórias que dificultam sua adoção em larga escala. Nesse contexto, o presente tópico reúne estudos que exploram soluções

inovadoras e experiências aplicadas, visando ampliar o conhecimento sobre práticas sustentáveis no setor ferroviário.

4.1.1 Reuso de dormentes em móveis e paisagismo

O reaproveitamento de dormentes de madeira em móveis e projetos de paisagismo é a via mais direta para seu reaproveitamento. Estudos apontam que essa prática não apenas reduz a geração de resíduos, mas também promove o prolongamento do ciclo de vida dos dormentes, conferindo-lhes nova função em ambientes urbanos e rurais, com pouco ou nenhum processamento (Damasceno *et al.*, 2017).

A aplicação prática desse tipo de reuso pode ser observada em diferentes contextos, a Figura 14 mostra a utilização dessas em projetos de mobiliários. Os dormentes de madeira têm sido utilizados para a confecção de bancos, mesas, prateleiras e aparadores, tanto em ambientes internos quanto externos.

Figura 14 - Reaproveitamento de dormentes na confecção de móveis rústicos



Fonte: (Vander Dormentes, 2025)

No Parque Madureira, no Rio de Janeiro, 115 dormentes de madeira foram doados por uma concessionária ferroviária e empregados em cercamentos, fixações de grama e criação de trilhas naturais no paisagismo, ilustrando uma abordagem sustentável de valorização dos resíduos (Redação Site da Baixada, 2024). Segundo a reportagem, essa aplicação, além de demonstrar que os dormentes agregam valor

estético, também possuem durabilidade e resistência, características que os tornam atrativos para práticas de design rústico e sustentável.

Além do uso em móveis, os dormentes de madeira também vêm sendo aplicados em obras e elementos simples na construção civil. Sua reutilização em escadas externas, passarelas de circulação e muros de pequeno porte, como demonstrado na Figura 15, evidencia sua versatilidade como elemento estrutural de segunda vida.

Figura 15 - Reaproveitamento de dormentes em elementos de paisagismo



Fonte: Autora (2026)

O engajamento e a divulgação dessas práticas têm sido fortalecidos por meio de plataformas digitais e redes sociais, que apresentam os projetos e produtos reais desenvolvidos a partir do reaproveitamento de dormentes. O perfil do Instagram (@ipedormetes) e vários outros divulgam diretamente os móveis, elementos paisagísticos e outras peças confeccionadas, mostrando as aplicações concretas do material, promovendo assim a valorização desses resíduos. No entanto, é importante destacar que os dormentes tratados com creosoto demandam cuidados específicos no manuseio, corte e acabamento, para garantir a segurança ambiental e evitar riscos à saúde humana devido à toxicidade do conservante químico (Damasceno *et al.*, 2017).

4.1.2 Dormentes de Madeira Lamelada Colada (MLC)

Carrasco *et al.* (2012) apresentam técnicas para a reciclagem de dormentes de madeira usados, transformando-os em novos dormentes de madeira lamelada colada (MLC) (Figura 16). Esse processo envolve várias etapas, iniciando pela classificação dos dormentes usados, que são avaliados quanto à densidade e integridade. Em seguida, os dormentes são cortados em folhas menores, eliminando falhas e imperfeições. Ainda segundo os autores, essas lâminas são unidas por meio de laminação, utilizando um adesivo resistente às intempéries, como o epóxi à base de isocianato, o que garante uma união durável entre as camadas de madeira.

Figura 16 - Dormente MLC no final do processo produtivo



Fonte: (Icimoto, 2018)

Esse cuidado com a seleção do material e a proteção das lâminas resulta em dormentes com resistência mecânica elevada e prolongamento da vida útil, que seria comprometida se descartados. Enquanto os dormentes tradicionais apresentam resistência à flexão entre 30 e 45 MPa, dependendo da espécie e tratamento, os dormentes de MLC reforçados podem alcançar resistências próximas a 60 Mpa (Carrasco, Passos e Dias, 2012; Icimoto, 2018). Para assegurar a qualidade da estrutura interna, os dormentes passam por ensaios ultrassônicos que verificam a uniformidade, garantindo resistência e durabilidade adequadas para aplicações ferroviárias (Carrasco, Passos e Dias, 2012).

Icimoto (2018) explorou alternativas para melhorar a durabilidade e resistência dos dormentes a partir da MLC, especialmente quando reforçados com fibra de vidro bidirecional. Esse tipo de reforço utiliza adesivo de poliuretano, o que amplia suas

propriedades mecânicas. Nos ensaios de flexão estática, os resultados indicaram que os dormentes de MLC com reforço apresentaram resistência de até 64,7 MPa. No ensaio de resistência ao cisalhamento, os valores chegaram a 11,1 MPa. Além disso, o reforço minimiza a delaminação entre as camadas de madeira, problema comum nesse tipo de material. Nos ensaios contínuos, o estudo demonstrou que os dormentes de MLC reforçados com fibra de vidro são tecnicamente viáveis para uso em aplicações ferroviárias. Estes dormentes apresentaram maior capacidade de carga, que chega a 96,4 kN, e melhor resistência ao desgaste em condições de aplicação dinâmica. Outro benefício apontado pelo estudo é a menor variabilidade nos resultados de resistência ao longo do tempo. Isso ocorre porque o reforço protege o material das falhas naturais da madeira, aumentando, assim, a vida útil do dormente. O estudo também sugere que o uso de madeira de reflorestamento, como o Pinus spp., reforçada com fibra de vidro, favorece práticas mais sustentáveis.

4.1.3 Produção de compósitos com madeira reciclada

Uma alternativa promissora é a transformação dos dormentes em materiais compósitos. Compósitos de madeira-cimento são produzidos pela combinação de partículas ou fibras de madeira com cimento Portland, resultando em um produto híbrido que reúne propriedades favoráveis de ambos os componentes (Ashori, Tabarsa e Amosi, 2012). Esses compósitos apresentam boa resistência mecânica, durabilidade e propriedades isolantes, além de oferecerem uma alternativa sustentável para o reaproveitamento de resíduos de madeira, como os dormentes ferroviários, reduzindo o impacto ambiental associado ao descarte desses materiais.

Ashori, Tabarsa e Amosi (2012) investigaram o uso de dormentes de madeira reciclada na produção de compósitos madeira-cimento, destacando tanto o aprimoramento das propriedades mecânicas quanto a contribuição para a sustentabilidade ambiental. O estudo analisou as características desses dormentes, frequentemente tratados com conservantes químicos para aumentar a durabilidade, o que pode representar riscos ambientais. Também detalhou o processo de fabricação dos compósitos, incluindo a preparação dos dormentes reciclados, a seleção dos materiais cimentícios e a definição da proporção ideal de mistura para maximizar a resistência e a durabilidade. Foram avaliados diferentes teores de cloreto de cálcio

(3%, 5% e 7%) e temperaturas de prensagem (25 °C e 60 °C), mantendo-se constantes a razão madeira/cimento de 40:60, espessura de 15 mm, pressão de 40 kg/cm² e tempo de prensagem de 5 minutos.

Os resultados mostraram que as propriedades mecânicas diminuíram com o aumento da temperatura de prensagem para 60 °C e aumentaram com o incremento do teor de cloreto de cálcio. A melhor combinação foi obtida com 25 °C e 7% de $CaCl_2$. A absorção de água variou entre 11% e 26,1% (após 2 horas de imersão), e o inchamento em espessura ficou entre 0,98% e 6,16%, dependendo da composição da mistura e das condições de fabricação. Os autores concluíram que as propriedades mecânicas e físicas dos compósitos de madeira-cimento contendo dormentes reciclados são compatíveis com as de compósitos produzidos com madeira virgem, confirmando sua viabilidade para aplicações como painéis, forros e divisórias.

4.1.4 Aproveitamento energético como biomassa e gás NOTAR

Entre as alternativas mais recorrentes, observa-se a utilização dos dormentes como biomassa para a cogeração de energia. Essa alternativa apresenta benefícios ambientais e econômicos. Além de reduzir a quantidade de resíduos destinados a aterros, diminuindo os impactos ambientais do descarte, a transformação dos dormentes em energia elétrica diversifica as fontes energéticas, mitigando o uso de combustíveis fósseis (Damasceno *et al.*, 2017). Além disso, segundo os mesmos autores, o uso de dormentes como biomassa pode ser uma alternativa econômica para a geração de energia nos próprios processos da ferrovia, sendo possível sua utilização em tecnologias como gaseificação, pirólise, combustão direta e produção de biogás.

Para viabilizar essa aplicação, o material precisa passar por etapas específicas de processamento. Conforme ainda descritos por Damasceno *et al.* (2017), os dormentes devem ser primeiramente triturados, reduzindo seu volume e facilitando a queima controlada em equipamentos apropriados. Posteriormente, o material passa por uma secagem, que tem como objetivo reduzir o teor de umidade e aumentar o poder calorífico da biomassa. A madeira triturada pode então ser armazenada a granel ou ensacada, conforme as exigências logísticas de transporte e destinação.

Orszulik (2015) também investigou o aproveitamento de dormentes ferroviários descartados como biomassa para geração de energia em caldeiras industriais do tipo *stoker-fired*, por meio da co-combustão com diferentes combustíveis. Entre as combinações avaliadas, a mistura contendo 20% em massa de dormentes de madeira e 80% de carvão mineral apresentou o melhor desempenho, alcançando poder calorífico de 20.094 kJ/kg, eficiência da caldeira de 81% e baixas emissões de poeira (30 mg/m³), atendendo integralmente aos limites mais rigorosos da classe 5 da norma PN-EN 303-5:2012. As misturas com linhito (80% de dormentes e 20% de linhito) e com palha de cereais (50% de dormentes e 50% de palha) apresentaram poderes caloríficos de 8.112 kJ/kg e 13.315 kJ/kg, respectivamente, eficiência de 62% em ambos os casos e emissões mais elevadas, enquadrando-se na classe 3 da mesma norma. As análises das cinzas e escórias indicaram que, a depender das concentrações de metais pesados como cobre e zinco, os resíduos podem ser aplicados em áreas agrícolas e de proteção ambiental (Grupos A e B) ou restritos a zonas industriais, de mineração e transporte (Grupo C). Contudo, em razão da presença de preservantes como o creosoto, a recuperação energética de dormentes ferroviários somente é considerada ambientalmente viável quando realizada em instalações industriais devidamente licenciadas e dotadas de sistemas eficientes de controle de emissões, de modo a assegurar a conformidade com a legislação vigente e a proteção da saúde humana e do meio ambiente (Orszulik, 2015).

Antes do aproveitamento energético, os dormentes ferroviários devem passar por uma etapa de redução granulométrica, realizada por meio de tecnologias industriais de trituração. Essa etapa requer equipamentos de grande porte, capazes de processar madeira densa, abrasiva e contaminada, produzindo partículas com granulometria adequada para aplicações energéticas. A presença de elementos metálicos, como pregos e parafusos de fixação, representa um desafio significativo no processamento dos dormentes ferroviários. Dessa forma, são necessários equipamentos de trituração capazes de processar materiais heterogêneos sem comprometer a segurança operacional e a eficiência do processo. Nesse contexto, algumas empresas desenvolveram trituradores específicos para esse tipo de material. Como exemplo, o Peterson 5710D Horizontal Grinder foi projetado especialmente para o processamento de madeira contendo elementos metálicos incorporados,

proporcionando maior proteção ao equipamento e maior confiabilidade operacional durante o processo de redução de tamanho (Astec Industries, Inc., 2017).

Damon *et al.* (2011) investigaram o uso de dormentes ferroviários tratados como biomassa para geração de energia por meio da tecnologia de gaseificação NOTAR, desenvolvida pela Xylowatt. O estudo aborda o desafio ambiental relacionado ao descarte desses dormentes, frequentemente impregnados com conservantes tóxicos, e propõe uma alternativa sustentável à incineração. A tecnologia NOTAR opera em altas temperaturas que variam entre 1100 a 1300 ºC capazes de destruir compostos perigosos, produzindo um gás de síntese limpo e energeticamente eficiente. O reator utilizado foi especialmente projetado para reduzir a formação de alcatrão e outros poluentes, garantindo que o gás resultante atenda aos padrões ambientais. Esse gás pode ser utilizado em motores de cogeração e processos térmicos, oferecendo uma solução técnica viável, econômica e ambientalmente adequada para a valorização energética de resíduos ferroviários.

4.1.5 Tratamentos químicos alternativos ao creosoto

Além dessas possíveis rotas, os tratamentos químicos alternativos ao creosoto também vêm sendo amplamente estudados como forma eficaz de prolongar a vida útil dos dormentes de madeira, com menor toxicidade. O naftenato de cobre, por exemplo, apresenta bom desempenho técnico e menor toxicidade ambiental em comparação aos preservantes tradicionais, sendo amplamente empregado nos Estados Unidos (Lombard e Kubiczki, 2011). Avanços mais recentes incluem o uso de cobre micronizado, presente em formulações como o MicroPro ou MCA-C (Micronized Copper Azole), que utiliza partículas de cobre dispersas em meio aquoso, resultando em menor lixiviação e maior retenção do produto na madeira (Harris, Hastings e Turner, 2019). Na Europa, destaca-se o Tanasote, um preservante oleoso de base cúprica aprovado sob o Regulamento de Produtos Biocidas (BPR), que tem se mostrado eficaz em aplicações de alta carga, como dormentes ferroviários, com durabilidade estimada entre 15 e 30 anos (TTJ Online, 2024). Por fim, estudos emergentes têm explorado o uso de extratos naturais, como chitosana, borra de café e resíduos lignocelulósicos, que apresentam propriedades antifúngicas promissoras e

baixo impacto ambiental, embora ainda se encontrem em fase experimental para uso em larga escala (Bogino, 2021).

4.2 VISITAS TÉCNICAS

4.2.1 Visita à concessionária ferroviária - pátios de descarte

Com o intuito de aprofundar a análise e obter dados empíricos que complementassem os achados da revisão bibliográfica, realizou-se uma visita técnica a um dos pátios operacionais de uma concessionária ferroviária situada na região Sudeste do Brasil. O objetivo da visita foi observar diretamente as práticas adotadas no descarte e na gestão de dormentes de madeira impregnados com creosoto.

A concessionária possui mais de 20 pátios de dormentes espalhados por três estados brasileiros. Diferentes profissionais da empresa relataram diferentes prioridades: enquanto a equipe de receitas alternativas buscava maximizar o preço e volume de venda dos dormentes, a equipe gestão de resíduos tinha como prioridade desfazer-se deles o mais rápido possível, mitigando os riscos relacionados ao seu armazenamento prolongado, como serão vistos a seguir. A equipe de operações, por sua vez, ressaltou a importância de se minimizar quaisquer interrupções ao fluxo comercial da via.

Os dormentes são dispostos de maneira mista nos pátios, sem segregação por tipologia ou condição física (Figura 17). A comercialização é realizada por metro cúbico, e a avaliação da qualidade do material ocorre de forma visual no momento do carregamento. Essa lógica transfere ao comprador a responsabilidade pela triagem posterior à aquisição, exigindo a separação manual entre dormentes em estado reutilizável e aqueles comprometidos, o que, da parte dos compradores, pode gerar insegurança quanto à previsibilidade da compra e compromete a eficiência do processo.

Figura 17 - Dormentes descartados junto à via férrea
(ilustração de um depósito na Ucrânia)



Fonte: (Oleksandr, 2021)

A concessionária está atualmente migrando parte de sua malha de dormentes de madeira para dormentes de concreto. Estimativas indicam que, em apenas um dos estados atendidos pela concessionária, são descartados anualmente dezenas de milhares de dormentes de madeira, sugerindo um potencial desequilíbrio entre a oferta desse material e a demanda do mercado. Não foi detectado um plano de manutenção que permitisse a previsibilidade da quantidade de dormentes que são destinados a cada pátio em cada período de tempo. Esse cenário reforça a urgência da adoção de soluções estruturadas e padronizadas para a destinação final desses resíduos.

No que tange às operações de retirada, verificou-se que os dormentes são disponibilizados por meio de dois sistemas predominantes: o uso de caçambas do tipo *roll-on roll-off* (que se destacam do caminhão), que são deixadas no pátio até serem preenchidas, e o modelo conhecido como “entrega casada”, em que cabe ao cliente providenciar, simultaneamente à chegada do material descartado no vagão de manutenção, todo o transporte necessário. Essa sistemática impõe severas restrições logísticas, uma vez que depende da liberação de janelas operacionais pela ferrovia, da pronta disponibilidade de veículos e equipamentos por parte da empresa

compradora, bem como da existência de espaço físico adequado para manobras e carregamento nos pátios.

Outro ponto crítico identificado refere-se à exigência de infraestrutura de carregamento e transporte própria por parte dos compradores. Eles devem dispor de caminhões, guinchos ou pinças hidráulicas, visto que a concessionária não fornece suporte para a movimentação interna dos materiais. Essa exigência representa uma barreira operacional relevante, restringindo o acesso apenas a compradores com estrutura logística adequada, o que limita o escoamento dos volumes acumulados para compradores menores.

Ainda assim, os compradores normalmente focam nos dormentes em melhor estado estético, que podem ser vendidos para mobília ou paisagismo. O restante dos dormentes, composto por lascas e madeira podre, chamado de “lenha” (Figura 18), permanece armazenado por semanas. Isso gera riscos ambientais e de segurança decorrentes do armazenamento prolongado dos dormentes, incluindo proliferação de animais peçonhentos, atos de vandalismo e elevado risco de incêndio, especialmente em períodos de estiagem prolongada.

Figura 18 - Dormentes “lenhas”



Fonte: Autora (2026)

Por fim, a própria concessionária reconhece que um dos principais desafios enfrentados atualmente é o acúmulo acelerado de dormentes descartados. Tal situação decorre da baixa eficiência dos sistemas de destinação vigentes e da pulverização dos volumes entre diversos pátios de pequeno porte. A estratégia institucional, nesse contexto, tem priorizado a remoção ágil dos dormentes, de modo

a evitar comprometer as operações ferroviárias comerciais, dado que o custo de interrupção da via para movimentação de resíduos é atualmente muito superior ao custo de manutenção dos pátios de dormentes. Contudo, essa priorização inviabiliza medidas estruturantes, como a centralização dos materiais ou a destinação sistemática por meio de recursos internos, como transporte e logística próprios. Por isso, é comum que compradores desloquem caminhões por centenas de km para buscar os dormentes em diversos pátios, a um alto custo e impacto ambiental de transporte.

4.2.2 Visita à unidade compradora de dormentes - Barroso/MG

Complementando a etapa anterior, foi realizada uma visita técnica a uma empresa, localizada no município de Barroso, Minas Gerais. A empresa adquire dormentes de madeira descartados pela mesma concessionária ferroviária da região Sudeste e os destina a diferentes segmentos produtivos, com destaque para os setores moveleiro, cerâmico e de serralheria.

A unidade dispõe de infraestrutura própria para a movimentação e o acondicionamento dos dormentes, utilizando guinchos, garras hidráulicas e caminhões basculantes no momento da coleta dos materiais nos pátios da ferrovia. Essa capacidade operacional é essencial, uma vez que, como mencionado anteriormente, a concessionária ferroviária não disponibiliza recursos para carga ou movimentação no local de origem, o que exige que a empresa compradora possua, além de caminhão, equipamentos específicos para içamento e transporte. Esse fator representa uma barreira significativa de entrada, limitando o acesso apenas a compradores com maior estrutura logística.

Durante a visita, verificou-se que os dormentes são reaproveitados em diversas aplicações, como mobiliário rústico, elementos arquitetônicos e queima em fornos cerâmicos, de acordo com o estado físico da madeira. Esses materiais também são transformados em produtos acabados por meio de uma empresa do mesmo grupo, que fabrica escadas, pergolados, bases para fogão a lenha, peças estruturais e elementos para contenção de muros. A comercialização ocorre de forma contínua, sem apresentar sazonalidade definida.

Entretanto, foram identificadas limitações operacionais relevantes. A principal refere-se à dependência da liberação de janelas operacionais pela concessionária ferroviária para viabilizar a retirada dos dormentes nos pátios. Essas liberações ocorrem de forma não periódica e imprevisível, condicionadas à disponibilidade de espaço e à rotina da concessionária. Como resultado, o comprador precisa manter sua frota e equipamentos prontos para mobilização imediata, o que eleva custos e dificulta o planejamento logístico.

A ausência de critérios padronizados para a alocação dos compradores aos pátios de descarte pode resultar em favorecimentos indiretos, uma vez que determinados clientes são previamente designados para unidades específicas. Como os dormentes disponíveis variam conforme as características operacionais da via, na maior parte das vezes, os dormentes de melhor qualidade são oriundos de trechos com menor tráfego/carga. Assim, essa designação prévia pode beneficiar compradores com acesso a materiais em melhores condições, em detrimento de outros, comprometendo a equidade no processo de comercialização.

Outro ponto crítico está relacionado à forma como os dormentes são dispostos nos pátios. Os materiais são alocados de forma aleatória, sem segregação por tipo, estado de conservação ou potencial de reaproveitamento. Como a venda ocorre por metro cúbico, o comprador não tem a oportunidade de selecionar previamente as peças que deseja adquirir. Assim, a triagem para separar os dormentes aproveitáveis daqueles inutilizados ocorre somente após a aquisição, gerando riscos e custos adicionais e desestimulando a compra em alguns casos, o que faz com que os dormentes permaneçam armazenados nos pátios.

4.2.3 Discussão - Diagnóstico dos principais desafios na gestão de dormentes descartados

Com base nas visitas técnicas realizadas à concessionária ferroviária e à unidade compradora de dormentes, além de buscas por pátios de descartes de dormentes no país pelo Google Maps e das entrevistas realizadas com profissionais diretamente envolvidos nas operações de descarte, transporte e reaproveitamento, foi possível identificar um conjunto de desafios que impactam a eficiência da cadeia de gestão dos dormentes de madeira descartados. O apresenta uma sistematização dos

principais entraves observados, organizados por categoria, com o intuito de subsidiar a formulação de estratégias mais eficazes de valorização e destinação final ambientalmente adequada.

Quadro 2 - Diagnóstico dos desafios observados nas buscas *online*, visitas técnicas e entrevistas

Categoria	Desafio identificado	Impactos
Logística e operação	Dependência de janelas operacionais esporádicas e imprevisíveis para retirada dos dormentes	Limita a previsibilidade e exige mobilização imediata de recursos por parte dos compradores
	Ausência de sistema de mapeamento e previsão de volumes nos pátios	Dificulta planejamento, negociação e alocação eficiente
	Pátios descentralizados e de difícil acesso	Aumenta os custos logísticos e reduz a viabilidade econômica do reaproveitamento
Infraestrutura	Falta de equipamentos adequados nos pátios (guinchos, trituradores móveis etc.)	Restringe reprocessamento no local, restringe a quantidade potencial de empresas para a compra e dificulta a remoção eficiente
	Disposição inadequada sobre o solo e ausência de cobertura	Gera riscos ambientais e compromete a integridade física dos dormentes
Classificação e triagem	Ausência de critérios padronizados para a separação e organização dos dormentes nos pátios de descarte.	Pode favorecer determinados compradores e dificulta critérios equitativos de comercialização
	Falta de triagem visual ou técnica quanto ao estado físico	Reduz a capacidade de direcionar dormentes conforme a aplicação mais adequada
Ambiental e segurança	Armazenamento prolongado	Riscos de incêndio, especialmente críticos em períodos de estiagem, contaminação do solo, presença de pragas e vetores e degradação da madeira

Fonte: Autora (2026)

Dessa forma, embora o reaproveitamento de dormentes de madeira descartados represente uma alternativa promissora, ainda persistem entraves operacionais que comprometem a efetividade desse processo. Nesse contexto, observa-se a necessidade de estabelecer protocolos operacionais uniformes para a distribuição e comercialização dos dormentes, assegurando maior equidade no acesso ao material. Além disso, é fundamental implementar mecanismos logísticos

mais previsíveis e acessíveis. A padronização dos procedimentos e a articulação eficiente entre os diferentes agentes envolvidos na cadeia de destinação são essenciais para garantir maior transparência, escalabilidade e sustentabilidade ao processo de reaproveitamento de dormentes ferroviários.

4.3 ESTRATÉGIAS DE VALORIZAÇÃO DOS DORMENTES

Dentre as alternativas estudadas para o reaproveitamento de dormentes ferroviários usados, diversas aplicações têm ganhado destaque por seu potencial de agregar valor a um resíduo que, de outra forma, exigiria descarte controlado. O quadro 3 resume as estratégias descritas anteriormente. Algumas rotas incluem o uso na construção civil e no setor moveleiro, tratamentos de recondicionamento para prolongar a vida útil, conversão em biomassa para fins energéticos, além de sua transformação em produtos como madeira laminada colada (MLC), compósitos madeira-cimento e até mesmo a geração de gás por processos termoquímicos. Essas soluções reforçam a importância de incorporar práticas sustentáveis e inovadoras no setor ferroviário.

Quadro 3 - Principais vias de valorização de dormentes de madeira descartados

Rota	Vantagens	Desvantagens/ Desafios
Reuso em móveis e paisagismo	• Reaproveitamento direto; • Resíduo é vendido ao invés de doado; • Baixo custo e pouco beneficiamento envolvido; • Apelo visual e estímulo à economia circular.	• Apenas os dormentes de melhor qualidade são comprados rapidamente; • Não foram identificados cuidados com os tratamentos químicos.
Madeira Laminada (MLC) e compósitos madeira-cimento	• Prolonga a vida útil da madeira; • Possibilita a fabricação de novos dormentes, painéis, forros e divisórias; • Agrega maior valor ao resíduo; • Reduz a demanda por madeira virgem.	• Necessita de processamento industrial (corte, laminação, colagem e prensagem); • Requer controle tecnológico e ensaios de qualidade.

Rota	Vantagens	Desvantagens/ Desafios
Geração de energia	• Aproveita dormentes sem valor estético ou estrutural (“lenhas”); • Reduz a quantidade de resíduos destinados ao descarte; • Pode ser aproveitado em processos da própria concessionária.	• Requer moagem com equipamentos especiais; • Venda a valores relativamente menores; • Caso não seja queimado em altas temperaturas, como o gás NOTAR, exige controle ambiental rigoroso devido à emissões de gases tóxicos;
Tratamentos químicos menos tóxicos para extensão da vida útil	• Aumentam a durabilidade dos dormentes; • Menor toxidade e lixiviação em comparação ao creosoto; • Contribuem para redução dos impactos ambientais e ocupacionais.	• Alguns preservantes apresentam custo superior ao creosoto; • Não solucionam o problema dos dormentes já impregnados com creosoto.

Fonte: Autora (2026)

Para o presente estudo de caso, considerando-se as características da região e da concessionária ferroviária estudada, as rotas de valorização de dormentes ferroviários descartados foram organizadas em três estratégias principais:

1. **Aprimoramento logístico**: a primeira estratégia está centrada no aprimoramento logístico, abrangendo desde o armazenamento até a retirada dos dormentes nos pátios. Propõe-se a criação de um sistema de mapeamento que permita prever o volume e a localização dos dormentes descartados, bem como estudar o custo-benefício da centralização dos resíduos em pátios específicos com melhor infraestrutura. Propomos também estudar a adoção de critérios padronizados para alocação e triagem, associada a processos de comercialização mais transparentes, para assegurar isonomia e previsibilidade para os compradores. Além disso, medidas como a disponibilização de equipamentos básicos de carga nos pátios (ou parcerias para tal fim) têm potencial para ampliar o acesso de pequenos e médios compradores, que não possuem infraestrutura própria. Tais aprimoramentos contribuiriam para aumentar a participação da indústria moveleira, de serralherias e demais segmentos produtivos, ao mesmo tempo em que se reduz o tempo de armazenamento nos pátios e os riscos associados à permanência prolongada dos resíduos. Essa é a opção com menos recursos envolvidos e menor barreira técnica, pois

abrange majoritariamente uma reorganização da forma de gestão atual da empresa. Entretanto, essa rota também traz um menor potencial de valorização dos dormentes além do que a empresa já realiza.

2. **Processamento para biomassa**: A segunda estratégia refere-se à trituração, com a implementação de unidades móveis ou fixas de processamento diretamente nos pátios ferroviários. Nesse modelo, os dormentes seriam triturados no próprio local de descarte, reduzindo custos com transporte e viabilizando a comercialização do material já processado, fracionado e ensacado. Essa solução favorece a ampliação do mercado consumidor, uma vez que o produto final pode ser adquirido por uma gama mais ampla de clientes, como indústrias cerâmicas e caldeiras de biomassa, que não dispõem de estrutura própria para trituração. Além disso, parte desse material pode ser destinada ao uso interno da própria concessionária ferroviária para geração de energia térmica ou elétrica, por meio de tecnologias como combustão direta, gaseificação ou pirólise, otimizando o aproveitamento energético dos resíduos e reduzindo a dependência de fontes fósseis. Para mitigar a emissão de compostos tóxicos decorrentes da presença de creosoto durante o processamento térmico, considera-se relevante investigar a viabilidade de tratamentos químicos menos poluentes, capazes de reduzir ou neutralizar tais contaminantes antes da conversão energética ou aquisição de tecnologia para gás NOTAR. Essa é uma opção intermediária em termos de recursos e potencial de valorização, pois exige a aquisição de equipamentos de trituração e ensacamento e, caso a própria empresa deseje aproveitar a biomassa, estrutura para um sistema de geração de eletricidade. Entretanto, tem como benefícios rotas técnicas e equipamentos já estabelecidos no mercado.
3. **Reciclagem para produção de novos dormentes**: a terceira estratégia está voltada à produção de novos dormentes a partir da reciclagem de madeira descartada, especialmente por meio da fabricação de MLC ou compósitos madeira-cimento. A produção de dormentes por MLC permite utilizar lâminas de madeira reaproveitadas, unidas por adesivos estruturais, com ou sem reforço por fibras, enquanto os compósitos madeira-cimento oferecem uma rota promissora para dormentes que já perderam suas

características estruturais originais. Essa rota possui a maior lacuna tecnológica, pois as pesquisas encontradas ainda estão em níveis de TRL (*Technology Readiness Level*, ou Nível de Prontidão Tecnológica) relativamente baixos (3 e 4). Entretanto, por transformar dormentes descartados em dormentes novos, tem o maior potencial de economia de recursos e impacto a longo prazo.

4.4 DETALHAMENTO DA ROTA DE VALORIZAÇÃO SELECIONADA EM CONJUNTO COM A CONCESSIONÁRIA

Após o levantamento das principais rotas de valorização de dormentes ferroviários identificadas na literatura e nas práticas adotadas por empresas do setor, as alternativas foram apresentadas e discutidas em conjunto com a concessionária ferroviária parceira desta pesquisa. Foi definida a elaboração de uma proposta de aprimoramento logístico para a gestão dos dormentes descartados. A escolha dessa rota foi baseada nas prioridades da concessionária. Essa estratégia busca otimizar o fluxo de movimentação dos materiais, reduzir os custos de transporte, melhorar a rastreabilidade e concentrar volumes em pátios estrategicamente localizados, criando condições mais favoráveis para sua comercialização e posterior destinação às diferentes rotas de valorização disponíveis. A proposta foi estruturada em quatro etapas principais: (I) levantamento dos dados operacionais, (II) definição dos centros de consolidação, (III) modelagem da otimização logística e (IV) análise dos resultados obtidos.

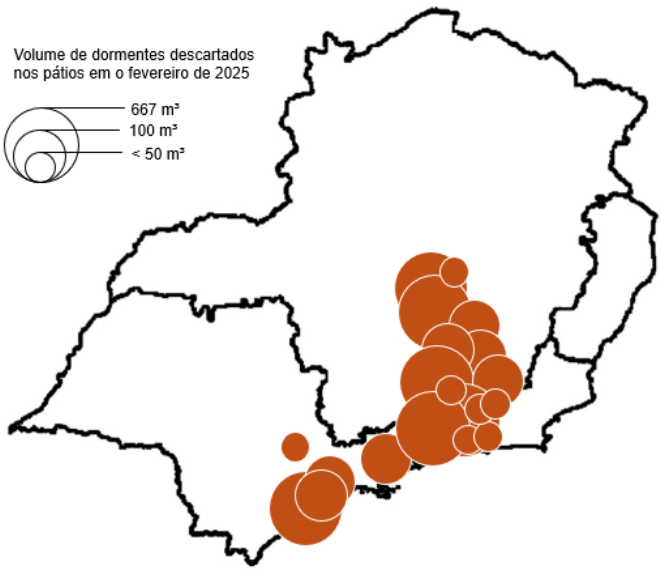
4.4.1 Levantamento dos dados de operação

Inicialmente, foi realizado o levantamento das informações necessárias para representar a operação logística da concessionária. Foram considerados os volumes de dormentes descartados em cada trecho da ferrovia, a localização dos pontos de remoção, os custos médios de transporte, a capacidade operacional disponível, e as formas atuais de destinação dos materiais. Também foram considerados possíveis compradores, permitindo avaliar a distribuição geográfica da demanda.

Essas informações constituíram a base para a construção do modelo de otimização, permitindo representar de forma mais realista o fluxo atual de

movimentação dos dormentes ao longo da ferrovia. A Figura 19 mostra a distribuição espacial dos pátios de armazenamento de dormentes da concessionária estudada e seus respectivos volumes.

Figura 19 - Distribuição espacial dos pátios ferroviários na região Sudeste e respectivos volumes de dormentes descartados



Fonte: Autora (2026)

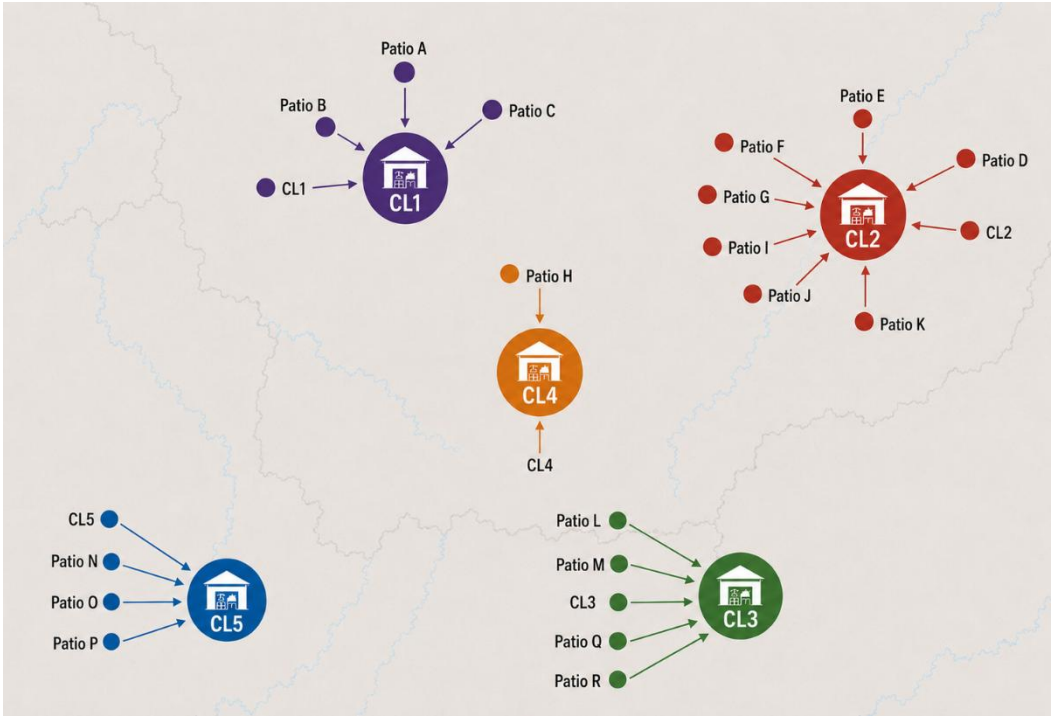
4.4.2 Definição dos centros de consolidação e modelagem logística

A segunda etapa consistiu na definição de pátios estratégicos que passariam a atuar como centros de consolidação dos dormentes descartados. A empresa atualmente divide seus dormentes em 23 pátios, com volumes anuais que variam entre 1 e 667 m3. A seleção dos centros de consolidação foi baseada em critérios técnicos, considerando principalmente o volume histórico de dormentes armazenados, a distribuição espacial ao longo da malha ferroviária, a proximidade de polos consumidores e a facilidade de acesso por rodovias. Dessa forma, os dormentes provenientes dos pátios de menor porte, com volumes de armazenamento pouco expressivos, passariam a ser direcionados a esses pátios centrais, otimizando a logística de consolidação e reduzindo a dispersão do material ao longo da malha.

Foram propostos cinco centros logísticos CL1, CL2, CL3, CL4 e CL5. Esses pátios apresentam localização estratégica, permitindo reduzir as distâncias médias percorridas e concentrar volumes suficientes para tornar a comercialização mais

atrativa. A adoção de centros de consolidação também proporciona maior padronização do armazenamento, facilita o planejamento operacional e permite a formação de lotes maiores para comercialização, reduzindo a necessidade de múltiplas viagens de pequeno porte. A Figura 20 ilustra as conexões entre os pátios de origem e seus respectivos centros de consolidação, evidenciando o direcionamento do fluxo de dormentes de cada pátio até o pátio central correspondente, conforme a solução obtida pelo método Simplex. Os círculos representam os pátios analisados, sendo o diâmetro de cada um proporcional ao volume aproximado de dormentes armazenados.

Figura 20 - Modelagem de otimização logística



Fonte: Autora (2026)

Após a definição dos centros logísticos e validação com uma representante da empresa, foi desenvolvido um modelo matemático de otimização utilizando Programação Linear, resolvido pelo método Simplex implementado no Solver do Microsoft Excel. O modelo teve como objetivo determinar automaticamente para qual centro de consolidação cada pátio de origem deveria enviar seus dormentes, buscando minimizar o custo logístico total da operação.

Para os dados de entrada foram utilizados os volumes de dormentes disponíveis em cada pátio na data disponibilizada e as distâncias rodoviárias aproximadas entre todos os pátios de origem e os centros propostos, como indicados na Tabela 5.

Tabela 5 - Matriz de entrada modelo Simplex

Distância de cada pátio até a central (km)						Volume (m³)
Centrais / Origem	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	
Patio A	55	285	430	405	425	58
Patio B	75	255	420	390	410	62,5
CL1	1	305	450	425	445	378,5
Patio C	140	285	470	430	450	1
Patio D	190	130	330	270	295	55
Patio E	320	85	210	115	165	50
Patio F	330	125	320	180	230	27
Patio G	345	110	335	195	245	28
Patio H	330	95	160	65	120	30
Patio I	300	40	220	115	165	1
Patio J	300	40	220	115	165	104
Patio K	305	1	200	135	160	1
CL2	305	1	200	135	160	666,8
CL4	425	135	120	1	100	82
CL5	445	160	55	100	1	100
Patio L	490	250	105	190	110	284
Patio M	490	250	105	190	110	137
Patio N	515	275	185	260	180	4
Patio O	465	225	115	150	70	77,5
Patio P	470	230	95	155	75	119
CL3	420	180	1	130	55	73
Patio Q	390	175	95	120	140	140
Patio R	380	185	75	145	160	10

Fonte: Autora (2026)

A função objetivo (Tabela 6) foi formulada considerando o custo de transporte proporcional à distância percorrida entre cada pátio de origem e seu respectivo pátio central e ao volume movimentado. Os pátios definidos como centrais (CLX) também foram considerados na movimentação, podendo atuar tanto como origem quanto como destino. Para representar essa possibilidade no modelo e atender à restrição do sistema, que não aceita valores de distância iguais a zero, foi atribuída uma distância simbólica de 1 km aos fluxos do tipo CLX → CLX. Essa distância não representa um

deslocamento real, sendo utilizada apenas para viabilizar o processamento computacional do modelo.

Tabela 6 - Função objetivo: volume x distância x custo

Origem	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5
Patio A	79750	413250	623500	587250	616250
Patio B	117187	398437	656250	609375	640625
CL1	9462	2886063	4258125	4021563	4210813
Patio C	3500	7125	11750	10750	11250
Patio D	261250	178750	453750	371250	405625
Patio E	400000	106250	262500	143750	206250
Patio F	222750	84375	216000	121500	155250
Patio G	241500	77000	234500	136500	171500
Patio H	247500	71250	120000	48750	90000
Patio I	7500	1000	5500	2875	4125
Patio J	780000	104000	572000	299000	429000
Patio K	7625	25	5000	3375	4000
CL2	5084350	16670	3334000	2250450	2667200
CL4	871250	276750	246000	2050	205000
CL5	1112500	400000	137500	250000	2500
Patio L	3479000	1775000	745500	1349000	781000
Patio M	1678250	856250	359625	650750	376750
Patio N	51500	27500	18500	26000	18000
Patio O	900937	435937	222812	290625	135625
Patio P	1398250	684250	282625	461125	223125
CL3	766500	328500	1825	237250	100375
Patio Q	1365000	612500	332500	420000	490000
Patio R	95000	46250	18750	36250	40000

Fonte: Autora (2026)

Para resolução do modelo pelo método Simplex (Solver), cada pátio de origem foi associado a apenas um centro logístico. Essa condição foi representada por variáveis binárias, nas quais o valor igual a 1 indica o envio para determinado centro e o valor 0 representa a inexistência desse fluxo. Dessa forma, o modelo identificou automaticamente a configuração logística que apresenta o menor custo total de transporte para toda a rede ferroviária. Os resultados da decisão de alocação são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Decisão de alocação dos pátios de origem aos centros logísticos obtida pelo Solver (método Simplex)

Origem	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	Soma
Patio A	1	0	0	0	0	1
Patio B	1	0	0	0	0	1
CL1	1	0	0	0	0	1
Patio C	1	0	0	0	0	1
Patio D	0	1	0	0	0	1
Patio E	0	1	0	0	0	1
Patio F	0	1	0	0	0	1
Patio G	0	1	0	0	0	1
Patio H	0	0	0	1	0	1
Patio I	0	1	0	0	0	1
Patio J	0	1	0	0	0	1
Patio K	0	1	0	0	0	1
CL2	0	1	0	0	0	1
CL4	0	0	0	1	0	1
CL5	0	0	0	0	1	1
Patio L	0	0	1	0	0	1
Patio M	0	0	1	0	0	1
Patio N	0	0	0	0	1	1
Patio O	0	0	0	0	1	1
Patio P	0	0	0	0	1	1
CL3	0	0	1	0	0	1
Patio Q	0	0	1	0	0	1
Patio R	0	0	1	0	0	1

Fonte: Autora (2026)

Com os centros de consolidação, o volume dos dormentes atualmente distribuídos entre os 23 pátios passaria a ser concentrado em apenas 5 centros logísticos. Dessa forma, os volumes estimados de armazenamento seriam de 499m³, 930,8 m³, 621,5m³, 262m³ e 173m³ para CL1, CL2, CL3, CL4 e CL5, respectivamente, favorecendo maior eficiência operacional, melhor infraestrutura de armazenamento e maior atratividade para a comercialização dos materiais.

4.4.3 Potenciais contribuições da proposta

A aplicação do modelo permite substituir o sistema atual, caracterizado pela gestão individualizada dos pátios, por uma estrutura centralizada, que permite diminuir custos de gerenciamento. Além da redução direta dos custos operacionais, a concentração dos materiais em poucos pontos estratégicos favorece a negociação

com compradores de maior porte e proporciona maior previsibilidade das operações logísticas. A centralização também facilita investimentos em infraestrutura, como a implantação de cobertura, equipamentos de içamento, sistemas de armazenamento e áreas adequadas para triagem, tornando esses investimentos mais viáveis economicamente do que sua distribuição entre diversos pátios de pequeno porte. O modelo ainda contribui para melhorar o controle dos estoques, facilitar a rastreabilidade dos dormentes descartados e tornar a gestão dos resíduos mais eficiente.

5 CONCLUSÃO

O descarte de dormentes ferroviários de madeira representa um importante desafio ambiental, operacional e econômico para o setor ferroviário. Após o fim da vida útil, esses materiais permanecem armazenados em pátios até sua destinação, aumentando riscos ambientais, operacionais e à saúde humana. Atualmente, as principais formas de reaproveitamento, que incluem aplicações em paisagismo, mobiliário, construção civil e geração de energia por biomassa, ainda apresentam limitações técnicas, logísticas e econômicas. Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo identificar e analisar alternativas para a valorização de dormentes descartados, considerando aspectos técnicos, operacionais, ambientais e econômicos para uma concessionária ferroviária localizada na região Sudeste do Brasil. A análise foi realizada por meio do levantamento, avaliação e desenvolvimento de rotas de valorização dos dormentes através de uma revisão da literatura, *benchmarking* com concessionárias ferroviárias, visitas técnicas e informações levantadas junto à concessionária.

A partir da integração entre a revisão bibliográfica e as visitas técnicas, foram estruturadas três estratégias para valorização dos dormentes descartados: (I) aprimoramento logístico; (II) processamento para produção de biomassa destinada ao aproveitamento energético; e (III) reciclagem da madeira para fabricação de novos dormentes por meio de madeira laminada colada ou compósitos madeira-cimento. Essas estratégias apresentam diferentes níveis de maturidade tecnológica, investimentos necessários e potencial de agregação de valor, permitindo sua adoção de forma gradual conforme as prioridades e capacidades operacionais da concessionária.

Em conjunto com a concessionária ferroviária parceira, foi selecionada e desenvolvida a proposta I, de aprimoramento logístico, por apresentar menor barreira técnica de implantação e maior compatibilidade às necessidades atuais da concessionária. Para essa alternativa foram propostos cinco centros de consolidação estrategicamente distribuídos ao longo da malha ferroviária, reorganizando a operação atualmente distribuída em 23 pátios. Os centros logísticos foram definidos a partir dos volumes de armazenamento, da proximidade de polos e da acessibilidade rodoviária. Além disso, foi desenvolvido um modelo de otimização por Programação Linear, utilizando o método Simplex, com o objetivo de minimizar os custos de

transporte, otimizar o fluxo de movimentação dos materiais, aprimorar sua rastreabilidade e concentrar maiores volumes para comercialização.

Com a estratégia selecionada, os cinco centros logísticos passariam a gerenciar de 173 a 931 m³ de dormentes descartados. A concentração de dormentes em pontos estratégicos potencialmente promoverá maior facilidade na negociação de venda de grandes lotes, redução dos custos operacionais, maior facilidade de controle dos estoques e melhorar a rastreabilidade dos resíduos, ampliando o potencial de aplicação das alternativas de valorização disponíveis.

Por fim, os resultados obtidos demonstraram que a metodologia adotada foi adequada para alcançar o propósito do estudo e permitiu identificar alternativas viáveis para a valorização de dormentes ferroviários de madeira usados. Os achados evidenciam que a valorização desses materiais não depende exclusivamente do desenvolvimento de novas tecnologias, mas também pode ser favorecida pela reorganização eficiente dos processos logísticos e gerenciais relacionados à sua destinação. Nesse sentido, a adoção de estratégias que integrem aspectos técnicos, ambientais, logísticos e gerenciais pode contribuir para uma gestão mais eficiente desses resíduos. Dessa forma, espera-se que os resultados apresentados contribuam para ampliar as discussões sobre alternativas sustentáveis para a gestão de dormentes descartados e para o fortalecimento de práticas alinhadas aos princípios da economia circular no setor ferroviário.

REFERÊNCIAS

@IPEDORMETES. Perfil IPE Dormentes. **Instagram**, 2025. Disponivel em: <https://www.instagram.com/ipedormentes/>. Acesso em: 12 ago. 2025.

A pilha de dormentes é uma preocupação em relação ao veneno. **ABC News**, Out 2008. Disponivel em: <https://www.abc.net.au/news/2008-10-02/sleeper-pile-a-poison-concern/529038>. Acesso em: 20 Jul 2026.

ABBADE, E. **Economia circular:** materiais e resíduos. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2024.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR ISO 14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, p. 46. 2009.

ABNT, A. B. D. N. T. NBR 7511: Dormentes de madeira - Requisitos e métodos de ensaio, Rio de Janeiro, 2013. 24.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 13221:2017 – Transporte terrestre de produtos perigosos — Requisitos para o sistema de embalagem, acondicionamento, rotulagem e documentação**. Rio de Janeiro. 2017.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 10004:2024 - Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro. 2024.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. **Toxicological Profile for Wood Creosote, Coal Tar Creosote, Coal Tar, Coal Tar Pitch, and Coal Tar Pitch Volatiles**. Atlanta. 2022.

ANDRADE, A. A. FERROESTE – Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A. Noções sobre locomotivas. , 2011. Disponivel em: <https://www.ferroeste.pr.gov.br/sites/ferroeste/arquivos_restritos/files/documento/2021-01/nocoes_sobre_locomotivas.pdf>. Acesso em: 18 Julho 2025.

ANTF. Mapa Ferroviário. **Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários**, 2024. Disponivel em: <https://www.antf.org.br/boletim-antf/mapa-ferroviario/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

ANTF, A. N. D. T. F. **Estatísticas do transporte ferroviário de cargas no Brasil**. São Paulo. 2022.

ANTT, A. N. D. T. T. **Resolução nº 5.232, de 18 de maio de 2016. Regulamenta o transporte rodoviário e ferroviário de produtos perigosos.** [S.l.]. 2016.

ANTT, A. N. D. T. T. **Resolução nº 5.946, de 1º de Junho de 2021. Altera normas da ANTT que versam sobre o transporte ferroviário de cargas**. [S.l.]. 2021.

ANVISA. **Resolução RDC nº 661, de 30 de março de 2022**. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Brasília. 2022.

ARAÚJO, R. V. **Gerenciamento de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

AREMA, A. R. E. A. M.-O.-W. A. **Manual for Railway Engineering**. Lutherville, MD (sede da AREMA). 2021.

ASHORI, A.; TABARSA, T.; AMOSI, F. Evaluation of using waste timber railway sleepers in wood–cement composite materials. **Construction and Building Materials**, p. 126-129, 2012.

ASTEC INDUSTRIES, INC. Peterson 5710D Horizontal Grinder – Specifications, 2017. Disponivel em: <https://cdn.wajax.com/wp-content/uploads/2017/12/Specification-Sheet17.pdf?>. Acesso em: 11 dez. 2025.

BASTOS, P. S. S. **Dormentes de concreto armado para ferrovias.** Rio de Janeiro. 1999.

BBC NEWS. Man dies after Hampshire railway bridge collapse. **BBC News**, 2020. Disponivel em: <ttps://www.bbc.com/news/uk-england-hampshire-51309162>. Acesso em: 18 jul. 2025.

BOCKEN, N. M. P. et al. Product design and business model strategies for a circular economy. **Journal of Industrial and Production Engineering**, 2016. 308–320.

BOGINO, S. M. Natural extracts as wood preservatives: a sustainable alternative. In: _____ **Wood Industry Research**. Londres: IntechOpen, 2021. Disponivel em: <https://www.intechopen.com/chapters/77689>.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente.** [S.l.]. 1998.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências., Brasília, DF, 2010.

BRINA, H. L. **Estradas de ferro 1:** Via Permanente. Belo Horizonte: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1988.

CAMPO NETO, O. Transporte ferroviário: evolução e perspectivas no Brasil. In: FIGUEIREDO, B. **Infraestrutura de transporte:** desafios e perspectivas para o desenvolvimento brasileiro. Brasília: IPEA, 2015. p. 241–266.

CARRASCO, E. V. M.; PASSOS, J. B.; DIAS, A. A. Recycling of used railway sleepers for the production of glued laminated timber (GLT). **BioResources**, 2012. v. 7, n. 1, p. 1108-111.

CARVALHO, G. L. L.; SILVEIRA, J. A. R. D. Trilhando o contexto do patrimônio ferroviário brasileiro: Um panorama sobre situação, memória e gestão. **ANAP Brasil**, p. 47-62, 2022.

CHANDRAN, P. et al. Supervised Machine Learning Approach for Detecting Missing Clamps in Rail Fastening System from Differential Eddy Current Measurements. **Applied Sciences-Basel**, 2021. volume 11, número 9.

COPE, D. L.; ELLIS, J. B. **Plain Line Maintenance of Track:** Volume 4 - British Railway Track. [S.l.]: Permanent Way Institution, 2001.

DAMASCENO, F. G. et al. Reaproveitamento de dormentes de madeira da estrada de ferro Carajás para a cogeação de energia elétrica. **Revista Brasileira De Ciências Ambientais**, n. 45, 2017. 1-18.

DAMON, C. et al. **Environmental Benefits with Used Railway Sleepers Fueling Xylowatt's NOTAR Gasification Technology**. Louvain-la-Neuve. 2011.

DNIT. ETM 002 – Lastro padrão de brita — Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Portal Gov.br**, 2019. Disponivel em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/ferrovias/instrucoes-e-procedimentos/especificacoes-tecnicas-de-materiais-e-servicos-ferroviarios-etm-ets/etm-002-lastro-padrao-de-brita.pdf>.

DNIT, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Especificação técnica de materiais: Dormentes.** Brasília. 2016.

DOLCI, G.; RIGAMONTI, L.; GROSSO, M. Potential for improving the environmental performance of railway sleepers with an outer shell made of recycled materials. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, 6, July 2020. 100160.

DORBRÁS. Companhia Brasileira de Dormentes Dorbrás, 2020. Disponivel em: <http://dorbras.com.br/?produtos/dormentes-de-concreto/dormentes-monobloco/>. Acesso em: 18 jul. 2025.

ESVELD, C. **Modern Railway Track**. 2. ed. ed. Utrecht: MRT Productions, 2001.

ESVELD, C. **Modern Railway Track**. [S.l.]: MRT Productions, 2020.

FERDOUS, W. et al. Composite railway sleepers – Recent developments, challenges and future prospects. **Composite Structures**, 134, Dezembro 2015. 158-168.

FOUNDATION, E. M. Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition, Cowes, 2013. Disponivel em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>.

GUO, Y. et al. Railway ballast material selection and evaluation: A review. **Construction and Building Materials**, 344, 2022.

HARRIS, W.; HASTINGS, L.; TURNER, B. **Performance of Micronized Copper Azole Treated Wood in Long-Term Exposure**. International Research Group on Wood Protection. [S.l.]. 2019.

HAUSBERGER, L.; CORDES, T.; GSCHÖSSER, F. Life Cycle Assessment of High-Performance Railway Infrastructure, Analysis of Superstructures in Tunnels and on Open Tracks. **Sustainability**, 15, April 2023. 7064.

HOMA, V. S. **Avaliação da durabilidade de dormentes de eucalipto tratado em diferentes condições de serviço.** São Paulo. 2013.

ICIMOTO, F. H. Dormentes de Madeira Lamelada Colada (MLC) reforçados com tecidos de fibra de vidro., 2018. Disponivel em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde-06082018-104852/publico/FelipeIcimotoDOcorrigida.pdf>.

ISO, I. O. F. S. **ISO 59020:2024: Circular economy — Measuring and assessing circularity performance**. 1 ed. Geneva. 2024.

KAEWUNRUEN, S.; LOPES, L. M. C.; PAPAELIAS, M. P. Georisks in railway systems under climate uncertainties by different types of sleeper/crosstie materials, 20, June 2018. 77 - 86.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the Circular Economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, 2017. 221–232.

KPMG. Pesquisa ESG 2022 – A jornada das empresas brasileiras, 2022. Disponivel em: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/br/pdf/2022/11/Survey-ESG.pdf>.

LIMA, D. A. E. A. Custos associados à gestão de resíduos perigosos no setor ferroviário: uma análise multicritério. **Revista Gestão & Sustentabilidade**, 2022. 44–59.

LOMBARD, J.; KUBICZKI, F. **Alternative Wood Preservatives for Railroad Crossties**. U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration. [S.l.]. 2011.

MANALO, A. . A. T. . K. W. . &. T. A. A review of alternative materials for replacing existing timber sleepers. **Composite Structures**, 2017. 603-1044.

MARCOTTE, S. et al. Avaliação do teor de HAP e fenóis extraíveis em água em dormentes usados da rede ferroviária francesa. **Chemosphere**, 01 setembro 2014. 1-6.

MORRELL, J. J. Performance of hardwood species in railroad tie applications. **Forest Products Journal**, Madison, EUA, 2007.

MUZYKA, R.; KOZIELSKA, B.; SAJDAK, M. Detection of contamination from railway sleeper waste in solid biofuel. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, 22, Dezembro 2024. 100993.

NABAIS, J. **Manual de Via Férrea**. Castelo Branco: Instituto Politécnico de Castelo Branco – Escola Superior de Tecnologia, 2014.

NABAIS, R. J. D. S. **Manual básico de engenharia ferroviária**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

OLEKSANDR, B. Pyrolysis is a promising way of wooden sleepers recycling. **Railway Supply**, Jan. 2021. Disponivel em: <https://www.railway.supply/pyrolysis-is-a-promising-way-of-wooden-sleepers-recycling/>. Acesso em: Jul 2026.

ORSZULIK, E. Expendable Railroad Sleepers, of Modern Fuels for Power Stoker Fired Boilers. **Journal of Advanced Chemical Engineering**, 2015. v. 4.

PAIVA, A. C. M. **Estrada de Ferro Madeira-Mamoré: impactos históricos e sociais**. [S.l.]. 2016.

PROFILLIDIS, V. A. **Railway Management and Engineering**. Grécia: Democritus Thrace University, 2014.

REDAÇÃO SITE DA BAIXADA. Dormentes de madeira da SuperVia viram paisagismo no Parque Madureira. **Site da Baixada**, 2024. Disponivel em: <https://sitedabaixada.com.br/cultura/2024/12/12/dormentes-de-madeira-da-supervia-viram-paisagismo-no-parque-madureira/?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 2025 ago. 01.

REMPELOS, G.; PRESTON, J.; BLAINEY, S. A carbon footprint analysis of railway sleepers in the United Kingdom. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 81, April 2020. 102285.

SADEGHI, J. . &. A. H. Development of improved railway track performance model for wood and concrete sleepers. **Construction and Building Materials**, 2010. 147–153.

SHANG, H.; SONG, Y.; OU, J. Behavior of air-entrained concrete after freeze-thaw cycles. **Acta Mechanica Solida Sinica**, 2009. 261-266.

SONG, X. et al. Comparative life cycle assessment of wooden, concrete and steel railway sleepers in China. **Journal of Cleaner Production**, 2017. 538–547.

STEFFLER, F. **Via Permanente Aplicada:** Guia Teórico e Prático. [S.l.]: LTC Editora, 2013.

THOMPSON, S. et al. Life Cycle Cost and Assessment of Alternative Railway Sleeper Materials. **Sustainability**, 14, July 2022. 8814.

TTJ ONLINE. Safety First Continues. **Timber Trades Journal**, 2024. Disponivel em: <https://www.ttjonline.com/analysis/safety-first-continues-10456345/>. Acesso em: 18 jul. 2025.

UFSC. Dormentes de aço: uma meta para 2016 na EFVM. Quais são as vantagens? **Observatório Metro-Ferroviário**, 27 out. 2014. Disponivel em: <https://observatoriometroferro.ufsc.br/tag/vale/>.

VALENTE, J. M. **Avaliação do reaproveitamento de dormentes de madeira da Estrada de Ferro Carajás para a cogeração de energia elétrica**. Belém. 2015.

VANDER DORMENTES. Móveis de dormentes de madeira em BH e região. **Vander Dormentes**, 2025. Disponivel em: <https://vanderdormentes.com.br/>. Acesso em: 14 agosto 2025.

VIDAL, J. C. et al. Análise da durabilidade de dormentes ferroviários de madeira tropical. **Revista Matéria**, 2015. v. 20, n. 4.

VIGNALI, G. Ballasted or ballastless for a railway infrastructure? A comparative environmental impact assessment of two solutions. **Cleaner Environmental Systems**, 12, Março 2024. 100158.

WASAKI ENGENHARIA. Qual a finalidade do dormente de concreto? **Wasaki Engenharia**, 2024. Disponivel em: <https://wasaki.com.br/qual-a-finalidade-do-dormente-de-concreto/>.