

Avaliação do Ciclo de Vida das Emissões de CO₂eq na Construção de Infraestrutura Ferroviária

Revisão Sistemática e Perspectivas de Aplicação ao Planejamento Ferroviário Brasileiro

Pedro Igor de Araújo Rêgo¹

<https://orcid.org/0009-0002-4581-0923>

Augusto Cesar de Mendonça Brasil²

<https://orcid.org/0000-0002-0009-9798>

Paulo Cesar Marques da Silva³

<https://orcid.org/0000-0001-9935-1609>

RESUMO

Introdução. O modo ferroviário é apresentado como alternativa de baixo carbono para o transporte de cargas e de passageiros, mas a implantação de sua infraestrutura fixa mobiliza grandes volumes de cimento, aço, terraplenagem e energia, gerando um passivo de carbono incorporado que se realiza antes do início da operação. A avaliação do ciclo de vida (ACV) é a metodologia consolidada para quantificar esse passivo, porém sua aplicação ao planejamento ferroviário brasileiro ainda é incipiente. **Objetivo.** Identificar, classificar e analisar criticamente como metodologias de ACV têm sido aplicadas para quantificar e reduzir emissões de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) na construção de infraestrutura ferroviária e discutir as condições de transferência dessas metodologias para a consolidação do planejamento da infraestrutura ferroviária brasileira. **Metodologia.** Revisão sistemática reportada com referência à declaração PRISMA 2020. As bases Scopus e Web of Science (All Databases, All Collections) foram consultadas em 21 de abril de 2026 com a mesma expressão booleana. Triagem, avaliação de texto completo e extração foram conduzidas por um revisor. Os estudos elegíveis foram classificados como primários de mitigação ou diagnósticos. Em razão da heterogeneidade metodológica, as evidências foram combinadas por síntese narrativa estruturada e mapa de evidências organizado em oito famílias de estratégias, preservando-se a fronteira, a unidade funcional e a linha de base originais de cada resultado. **Resultados.** Das 365 referências recuperadas, 254 foram triadas, 37 avaliadas em texto completo e 34 incorporadas à síntese substantiva (21 estudos primários de mitigação e 13 estudos diagnósticos). Cimento, concreto e aço de reforço, túneis e estações subterrâneas, terraplenagem e energia de canteiro constituíram os pontos críticos recorrentes. Dezenove estudos primários relataram ao menos uma redução quantificada, com valores ilustrativos que variaram de cerca de 29% para concreto de dormentes com escória álcali-ativada e de 48% a 51% para peças pré-moldadas de plataforma de menor carbono, a 12,59% para uma estação de metrô pré-fabricada. Nenhum estudo alcançou alta confiança, e as evidências brasileiras identificadas foram exclusivamente diagnósticas. **Conclusão.** As evidências sustentam a incorporação precoce da ACV ao ciclo de decisão dos projetos ferroviários, com linha de base de carbono definida ainda na fase de planejamento, prioridade à eficiência material antes da substituição de insumos, uso de ligantes e aços de menor carbono, reaproveitamento de material escavado e de demolição, otimização de formas de via e de estruturas e energia de canteiro mais limpa. Percentuais estrangeiros não devem ser transpostos diretamente ao Brasil: o perfil renovável da matriz elétrica, o fator clínquer do cimento nacional e as distâncias e os modos de suprimento específicos de cada projeto podem alterar tanto a magnitude quanto a hierarquia das medidas, o que torna prioritária a construção de fatores de emissão regionais e de estudos de caso brasileiros de escala real.

Palavras-chave

Avaliação do ciclo de vida; Infraestrutura ferroviária; Emissões de CO₂ equivalente; Carbono incorporado; Planejamento de transportes.

Submetido em: 27/07/2026 – **Aprovado em:** 01/09/2026 – **Publicado em:** 01/09/2026

- 1 Engenheiro civil e mestrando do Programa de Pós-Graduação em Transportes (PPGT), Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Distrito Federal, Brasil. E-mail: pedro.rego@aluno.unb.br. Autor correspondente: Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Programa de Pós-Graduação em Transportes, Prédio SG-12, 1º andar, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília/DF, CEP 70.910-900. Telefone: (61) 99628-4888.
- 2 Doutor em Engenharia Mecânica; Professor Titular do Programa de Pós-Graduação em Transportes (PPGT), Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Distrito Federal, Brasil. E-mail: ambrasil@unb.br.
- 3 Doutor em Estudos de Transportes; Professor Associado do Programa de Pós-Graduação em Transportes (PPGT), Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Distrito Federal, Brasil. E-mail: pcmsilva@unb.br.



Life Cycle Assessment of CO₂eq Emissions from Railway Infrastructure Construction

a Systematic Review and Prospects for Application to Brazilian Railway Planning

ABSTRACT

Introduction. Rail is promoted as a low-carbon transport mode, yet building its fixed infrastructure mobilises large volumes of cement, steel, earthworks and energy, creating an embodied-carbon burden that materialises before operations begin. Life cycle assessment (LCA) is the consolidated methodology for quantifying this burden, but its application to Brazilian railway planning remains incipient. **Objectives.** To identify, classify and critically appraise how LCA methodologies have been applied to quantify and reduce carbon-dioxide-equivalent (CO₂eq) emissions from railway-infrastructure construction, and to discuss the conditions for transferring these methodologies to the consolidation of Brazilian railway-infrastructure planning. **Methods.** A systematic review reported with reference to the PRISMA 2020 statement. Scopus and Web of Science (All Databases, All Collections) were searched on 21 April 2026 using the same Boolean query. Screening, full-text assessment and extraction were conducted by one reviewer. Eligible studies were classified as primary mitigation studies or diagnostic studies. Owing to methodological heterogeneity, evidence was combined through a structured narrative synthesis and an evidence map organised into eight strategy families, retaining each result's original boundary, functional unit and baseline. **Results.** Of 365 retrieved records, 254 were screened, 37 assessed at full text and 34 entered the substantive synthesis (21 primary mitigation studies and 13 diagnostic studies). Cement, concrete and reinforcing steel, tunnels and underground stations, earthworks and site energy were the recurring hotspots. Nineteen primary studies reported at least one quantified reduction, with illustrative values ranging from about 29% for alkali-activated slag sleeper concrete and 48–51% for lower-carbon precast platform components to 12.59% for a prefabricated subway station. No study reached high confidence, and the Brazilian evidence identified was exclusively diagnostic. **Conclusions.** The evidence supports embedding LCA early in the railway project decision cycle, with a construction-carbon baseline set during planning, material efficiency before input substitution, lower-carbon binders and steel, reuse of excavated and demolition material, optimised track forms and structures, and cleaner site energy. Foreign percentages should not be transposed directly to Brazil: the renewable profile of the electricity mix, the clinker factor of national cement, and project-specific supply distances and transport modes may alter both the magnitude and the ranking of measures, making regional emission factors and full-scale Brazilian case studies a priority.

Keywords

Life cycle assessment; Railway infrastructure; CO₂ equivalent emissions; Embodied carbon; Transport planning.

1 INTRODUÇÃO

As consequências climáticas do desenvolvimento ferroviário não se limitam à circulação dos trens. Nas evidências revisadas, a construção da infraestrutura apareceu, em alguns contextos, como parcela secundária das emissões de ciclo de vida e, em outros, como a fase dominante. No Metrô do Rio de Janeiro, a construção foi a fase de maior emissão do ciclo de vida, com cimento, concreto, aço, combustível de equipamentos, combustível de transporte e eletricidade como principais alvos (ANDRADE; D'AGOSTO, 2016). No caso da ferrovia de alta velocidade do País Basco, túneis e viadutos dominaram a pegada construtiva, com os túneis associados a aproximadamente dois terços das emissões de construção (BUENO; HOYOS; CAPELLÁN-PÉREZ, 2017); a avaliação do metrô subterrâneo de Mumbai identificou, de modo semelhante, as estações subterrâneas como maior contribuinte da infraestrutura, impulsionadas por concreto e aço de reforço (SHINDE; DIKSHIT; SONI, 2024). As vantagens operacionais frequentemente atribuídas ao modo ferroviário não podem, portanto, ser utilizadas para desconsiderar as emissões liberadas antes de uma linha entrar em serviço.

Esse passivo construtivo decorre de um conjunto heterogêneo de ativos e processos: terraplenagem e subleitos, túneis, viadutos e pontes, estações subterrâneas e de superfície, via lastreada e não lastreada, trilhos, dormentes, fixações, barreiras acústicas, máquinas de via permanente, transporte de materiais e recuperação em fim de vida. Os pontos críticos de carbono variam conforme o ativo e a fronteira adotada. Cimento e aço são recorrentes em estações, túneis, dormentes de concreto, via em laje e estruturas civis (KAEWUNRUEN; SRESAKOOLCHAI; YU, 2020; LEE; LEE; CHUN, 2020; SHINDE; DIKSHIT; SONI, 2024); a produção industrial a montante pode superar as emissões diretas de canteiro quando as cadeias de suprimento são avaliadas por métodos de insumo-produto (WANG et al., 2023; CHENG et al., 2020); e terraplenagem, lastro, dormentes e trilhos tornam-se prioridades em avaliações de rede ou anualizadas (SILVA; MOURA; MONTEIRO, 2023; LANDGRAF; HORVATH, 2021; MILFORD; ALLWOOD, 2010).

É decisivo reconhecer que “carbono de construção” não é uma grandeza única nem reportada de forma consistente. Alguns estudos quantificam a produção de materiais (módulos A1–A3); outros acrescentam transporte (A4) e instalação (A5); outros modelam construção, manutenção, renovação e fim de vida ao longo de 40 a 100 anos, e vários adotam fronteiras do berço ao túmulo ou do berço ao berço, com créditos do módulo D reportados separadamente. As unidades funcionais vão de um dormente, um metro cúbico de concreto, uma tonelada de material escavado reciclado ou um metro de via por ano até uma estação inteira, um túnel, uma rede nacional ou o desenvolvimento acumulado até 2060.

Essas diferenças alteram o significado tanto das emissões absolutas quanto dos percentuais de redução: uma redução de 50% relativa ao ligante não equivale a uma redução de 50% no empreendimento, e um crédito do módulo D não pode ser somado a um resultado A1–A5 a menos que a fonte defina essa combinação.

Essa fragmentação metodológica é justamente o obstáculo prático que se interpõe entre a literatura internacional e o planejamento ferroviário brasileiro. O novo marco legal do setor instituiu o regime de autorização ferroviária, e a carteira da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) inclui novos projetos e corredores em estruturação (BRASIL, 2021; ANTT, 2025). Cada empreendimento cria, simultaneamente, a possibilidade de benefícios operacionais futuros e um passivo de carbono construtivo concentrado no curto prazo. Decidir traçado, tipologia estrutural, profundidade de estação, forma de via e balanço de terraplenagem com base em carbono exige uma metodologia comum de contabilização, que é papel desempenhado pela ACV, e fatores de emissão representativos da realidade produtiva e logística de cada projeto.

Uma síntese sistemática é necessária por três razões: as opções de mitigação específicas do modo ferroviário estão dispersas entre ativos, escalas e delineamentos de pesquisa; os resultados de carbono frequentemente não são diretamente comparáveis; e a implementação depende de condições que os percentuais isolados não capturam, incluindo disponibilidade de materiais, desempenho de engenharia, vida útil, distância de transporte, intensidade de carbono da eletricidade, acesso ferroviário, controle de qualidade, regras de contratação e transparência de dados. Este artigo tem por objetivo, portanto, identificar e sintetizar criticamente como metodologias de ACV vêm sendo aplicadas para avaliar e reduzir emissões de CO₂eq na construção de infraestrutura ferroviária, examinando materiais, tecnologias, decisões de projeto, métodos construtivos, estratégias logísticas, alternativas energéticas, práticas de economia circular e abordagens de planejamento, e discutir as condições de aplicação desse instrumental ao caso brasileiro. Seis questões orientam a revisão:

QP1. Que estratégias foram avaliadas ou propostas para reduzir emissões de CO₂eq na construção de infraestrutura ferroviária?

QP2. Quais ativos ferroviários, etapas construtivas, materiais e processos são os principais alvos?

QP3. Que reduções de carbono foram quantificadas e sob quais linhas de base, unidades funcionais, fronteiras de sistema e cenários?

QP4. Qual a maturidade e a solidez metodológica das evidências de mitigação disponíveis?

QP5. Que condições técnicas, ambientais, econômicas, logísticas, institucionais e geográficas afetam a implementação e a transferibilidade?

QP6. Que pontos críticos de carbono, lacunas de evidência e prioridades de pesquisa emergem, em particular para o planejamento ferroviário brasileiro?

A contribuição pretendida é um mapa de evidências que separa ensaios de mitigação de evidências diagnósticas, distingue contagens de estudos de contagens de intervenções, preserva o contexto contábil das afirmações quantitativas e traduz as evidências em implicações proporcionais para o planejamento, o projeto, a contratação e a execução de obras ferroviárias no Brasil.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Esta seção estabelece o referencial conceitual que sustenta a revisão: a estrutura normativa da ACV e sua adaptação a obras de infraestrutura, a noção de carbono incorporado aplicada a ativos ferroviários e o estado do planejamento ferroviário brasileiro no que se refere à incorporação de critérios de carbono.

2.1 Avaliação do ciclo de vida: estrutura normativa e adaptação à infraestrutura

A ACV é normalizada pelas ISO 14040 e ISO 14044, que estruturam o estudo em quatro fases interdependentes: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação (ABNT, 2025a; ABNT, 2025b). Duas escolhas feitas na primeira fase condicionam toda a comparabilidade posterior. A primeira é a unidade funcional, referência quantificada à qual todos os fluxos são normalizados; a segunda é a fronteira do sistema, que define quais processos são incluídos. Em infraestrutura, ambas admitem formulações muito distintas, sendo por quilômetro de linha, por metro de via por ano de serviço, por estação, por dormente, e é essa liberdade que explica boa parte da incomparabilidade observada na literatura ferroviária.

Para produtos e obras de construção, a EN 15804 padronizou a organização dos resultados em módulos: A1–A3 para produção de materiais, A4 para transporte até a obra, A5 para instalação, B para uso e manutenção, C para fim de vida e D para benefícios e cargas além da fronteira do sistema (CEN, 2021). Essa modularização é particularmente relevante para o setor ferroviário porque permite isolar o carbono de construção (A1–A5) daquele associado à operação, à manutenção e à renovação, e porque impede que créditos de reciclagem (módulo D) sejam indevidamente somados a resultados de construção. Na prática, entretanto, a adesão a essa estrutura é irregular: A4 e A5 são frequentemente agregados ou omitidos, e a declaração explícita dos módulos considerados ainda não é universal.

Dois abordagens de inventário coexistem. A ACV de processo, mais comum em estudos de componentes, rastreia fluxos físicos elementares e oferece elevada resolução tecnológica, mas está sujeita a truncamento de fronteira. A análise de insumo-produto, empregada em estudos de escala nacional e de cadeia de suprimento, captura efeitos indiretos amplos ao custo de menor resolução tecnológica.

A convivência dos dois métodos em uma mesma literatura ajuda a explicar por que reduções percentuais reportadas em escala nacional tendem a ser muito superiores às aquelas obtidas em escala de canteiro, sem que isso signifique maior efetividade técnica.

2.2 Carbono incorporado em ativos ferroviários

O conceito de carbono incorporado designa as emissões associadas à extração, ao processamento, ao transporte e à aplicação dos materiais que constituem um ativo, em contraposição ao carbono operacional. Em ferrovias, o carbono incorporado concentra-se em poucos materiais e poucas tipologias construtivas. Estruturas subterrâneas e elevadas concentram consumo de concreto e aço; a superestrutura de via distribui impacto entre trilhos, dormentes, fixações e lastro, com peso relativo fortemente dependente da vida útil e da anualização adotadas; e a terraplenagem, muitas vezes subestimada em estudos de componentes, torna-se determinante em corredores de grande extensão. Essa concentração é o que confere sentido prático à ACV no planejamento: poucas decisões de projeto (traçado, tipologia estrutural, profundidade de estação, forma de via, balanço de corte e aterro) governam a maior parte do carbono que será posteriormente incorporado.

Uma consequência metodológica importante é a distinção entre evidências diagnósticas e evidências de mitigação. Estudos diagnósticos quantificam onde estão as emissões e são indispensáveis para direcionar esforços, mas não demonstram que uma medida proposta funciona. Estudos primários de mitigação avaliam ou modelam uma intervenção específica contra uma linha de base declarada. Confundir os dois papéis é uma fonte recorrente de superestimação do estado da arte, e por isso essa distinção foi adotada como critério explícito de classificação nesta revisão.

2.3 O planejamento ferroviário brasileiro e a lacuna de aplicação da ACV

A Lei nº 14.273/2021 instituiu o regime de autorização para a exploração de ferrovias federais, ampliando os instrumentos disponíveis para a implantação de novos empreendimentos (BRASIL, 2021). Paralelamente, a carteira da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) reúne projetos como o Corredor Leste–Oeste (FICO–FIOL), a EF-118 e a EF-170 (Ferrogrão), entre outras iniciativas de novas outorgas e reorganização de malhas (ANTT, 2025). Esse conjunto representa, simultaneamente, uma oportunidade de redução de emissões operacionais no longo prazo e um passivo de carbono construtivo concentrado no curto prazo, precisamente o objeto que a ACV permite quantificar.

Do ponto de vista da infraestrutura de dados, o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) mantém o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil), e o Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO) aprovou o Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (BRASIL, 2010; IBICT, 2024). Duas condições nacionais devem ser tratadas explicitamente na transferência de resultados internacionais. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2025), a participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira foi de 88,2% em 2024; o *roadmap* setorial do cimento estimou razão clínquer/cimento de 67% em 2014, com trajetória projetada de redução para 52% em 2050 (SNIC; ABCP, 2019). Essas características podem alterar o ganho marginal de medidas centradas, respectivamente, na eletricidade de canteiro e na substituição de clínquer. Já o módulo A4 deve ser calculado com as distâncias e os modos efetivos de suprimento de cada empreendimento, pois as fontes consultadas não sustentam a adoção de um padrão nacional único. Assim, a hierarquia de medidas eficaz no Brasil pode diferir daquela observada na literatura internacional, hipótese examinada nesta revisão.

A literatura brasileira identificada nesta revisão é, contudo, de natureza diagnóstica. O estudo do Metrô do Rio de Janeiro (ANDRADE; D'AGOSTO, 2016) quantifica emissões de ciclo de vida de um sistema metroferroviário e identifica a construção como fase dominante, mas não avalia intervenções de mitigação contra uma linha de base. Não foram identificados, nas bases consultadas, estudos primários de mitigação em obras ferroviárias brasileiras. Essa constatação delimita com precisão a lacuna que motiva o recorte adotado neste artigo.

3 METODOLOGIA

3.1 Delineamento da revisão e referencial de reporte

Trata-se de revisão sistemática da literatura, de caráter exploratório e qualitativo quanto à síntese, reportada com referência à declaração PRISMA 2020 (PAGE et al., 2021). A revisão não foi registrada e nenhum protocolo foi elaborado ou publicado antes da triagem; essas limitações são reportadas explicitamente na seção 5.6. Por sintetizar estudos previamente publicados, a pesquisa não demandou aprovação ética.

3.2 Critérios de elegibilidade

A elegibilidade substantiva compreendeu dois papéis de evidência, ambos exigindo evidência original, contexto de construção de infraestrutura ferroviária e desfecho explícito relacionado a carbono (Quadro 1). Estudos primários de mitigação avaliaram ou modelaram uma medida específica relevante para a construção e, quando um efeito foi quantificado, identificaram uma linha de base ou comparador.

Estudos diagnósticos ou de pontos críticos quantificaram emissões da etapa de construção, contribuições de materiais ou componentes, ou ativos prioritários capazes de orientar o direcionamento das medidas, mas não foram tratados como evidência de que uma intervenção não testada seja efetiva. Foram excluídos relatos que abordassem operação, material rodante ou benefícios de transferência modal sem desfecho relevante para a construção; que não apresentassem evidência original; ou que não reportassem desfecho de carbono elegível. Não se aplicaram restrições de idioma ou de data de publicação.

Quadro 1 - Critérios de elegibilidade e papéis de evidência

Critério	Requisito de inclusão substantiva
Contexto construtivo	Construção de infraestrutura ferroviária, incluindo ferrovia pesada, alta velocidade, metrô, veículo leve sobre trilhos, terraplenagem, estruturas, estações, túneis, via, eletrificação, equipamentos de construção ou cadeias de suprimento relevantes.
Desfecho de carbono	Desfecho explícito de CO ₂ , CO ₂ eq, GEE, potencial de aquecimento global, carbono incorporado ou pegada de carbono relacionado à construção de infraestrutura ferroviária.
Evidência original	ACV, inventário de carbono, modelo de cenário, experimento de campo ou de laboratório, ou evidência primária de projeto/caso. Revisões sem evidência original não foram incluídas substantivamente.
Papel primário de mitigação	Avaliação ou modelagem de medida específica relevante para a construção; comparador ou linha de base exigidos para afirmações quantificadas de efetividade.
Papel diagnóstico	Quantificação de pontos críticos, participações, ativos, componentes ou processos da etapa de construção que orientem prioridades de mitigação, mesmo sem intervenção testada.
Exclusões	Evidência restrita a operação, material rodante ou transferência modal, sem desfecho construtivo; ausência de evidência original; ausência de desfecho de carbono elegível; ou ausência de pertinência à construção ferroviária.

Fonte: os autores (2026).

3.3 Fontes de informação e estratégia de busca

Foram consultadas duas bases bibliográficas eletrônicas: Scopus e Web of Science (All Databases, All Collections), ambas em 21 de abril de 2026. Na Scopus, a expressão foi aplicada aos campos título, resumo e palavras-chave; na Web of Science, empregou-se busca por tópico. A mesma expressão booleana foi aplicada às duas bases: *(CO2 AND Rail AND construction) OR (CO2 AND Railway AND construction)*. Na Scopus, os resultados foram restritos a tipo de documento = artigo, tipo de fonte = periódico e estágio de publicação = final (142 registros); na Web of Science, a tipo de documento = artigo (223 registros), totalizando 365 registros. Não foram realizadas buscas em bases adicionais, em literatura cinzenta, buscas manuais em periódicos nem rastreamento de citações para trás ou para frente.

3.4 Processo de seleção

Os registros das duas bases foram combinados e as duplicatas foram identificadas por comparação de DOI, título e periódico antes da triagem. Um revisor conduziu a triagem por título e resumo, a avaliação de texto completo e a extração de dados, o que é reconhecido como limitação (seção 5.6). Os textos completos dos 37 relatos potencialmente relevantes foram obtidos. Dois relatos foram excluídos após a avaliação de texto completo: Fernández et al. (2022) não reportou desfecho de carbono elegível, e Rungskunroch, Shen e Kaewunruen (2021) tratou de medidas operacionais ou de material rodante, e não de desfecho ou intervenção relevante para a construção. Mintzia et al. (2018) foi mantido exclusivamente como registro metodológico e contextual, fora da síntese substantiva, que passou a compreender 34 estudos. O fluxo de registros é apresentado no diagrama de fluxo PRISMA 2020 (Figura 1).

3.5 Extração de dados e itens extraídos

Os dados foram extraídos com formulário padronizado. Campos de nível de artigo cobriram identificação, autoria, ano, fonte, DOI, geografia, contexto do empreendimento, financiamento, conflitos de interesse e situação de correção ou retratação. Campos de caracterização do estudo cobriram objetivo, delineamento, fonte de evidência, sistema ferroviário, ativo, escala, período, atividades construtivas e fases do ciclo de vida. Campos de contabilização de carbono cobriram método, fronteira do sistema, módulos do ciclo de vida, unidade funcional, vida útil, escopo geográfico e temporal dos fatores de emissão, dados primários e secundários, bases de dados, normas, método de caracterização, gases, categorias de impacto, software, premissas de eletricidade e combustível, alocação, regras de reciclagem e corte, linha de base, cenários, sensibilidade e incerteza. Cada intervenção distinta recebeu uma linha de medida, com nome, etapa construtiva, ativo afetado, categoria de mitigação, intervenção e linha de base, redução quantificada, emissões absolutas de linha de base e de intervenção, ponto crítico endereçado, mecanismo, compensações, cobenefícios, maturidade, condições, barreiras, transferibilidade e localização da evidência. Quando um valor não foi reportado, registrou-se “não reportado” (NR), sem imputação.

3.6 Classificação das evidências

Para evitar superestimação, os estudos foram classificados por papel antes da síntese. Os 21 estudos primários de mitigação constituíram a base das afirmações sobre efetividade de intervenções; os 13 estudos diagnósticos foram utilizados para identificar etapas, materiais, componentes e variáveis de planejamento intensivos em carbono, mas não para validar medidas não testadas.

O registro metodológico foi mantido fora da síntese substantiva, e os relatos excluídos não contribuíram com achados. Ao longo dos 37 registros sumarizados, foram registradas 167 linhas de medida; as conclusões sobre intervenções restringiram-se às 111 linhas provenientes dos estudos primários. Contagens de estudos e de medidas foram mantidas separadas, e cenários combinados foram contados uma única vez, sem atribuir a redução conjunta a cada componente.

3.7 Avaliação crítica

Dada a heterogeneidade dos delineamentos, predominantemente ACV e modelagem de cenários, a qualidade metodológica e a aplicabilidade foram avaliadas segundo critérios adaptados para evidências do tipo ACV: pertinência e aplicabilidade ferroviária; transparência e adequação da fronteira do sistema e da unidade funcional; representatividade e vigência dos fatores de emissão e dos dados de inventário; uso de normas reconhecidas, como EN 15804 e ISO 14040 e 14044; tratamento de sensibilidade e incerteza; e clareza da linha de base e da contabilização da redução. Cada estudo recebeu classificação global de confiança, mantida sem elevação. As avaliações informaram a síntese e são reportadas junto aos resultados, não tendo sido utilizadas para excluir estudos. Não se realizou avaliação formal de viés de reporte por resultados ausentes.

3.8 Método de síntese

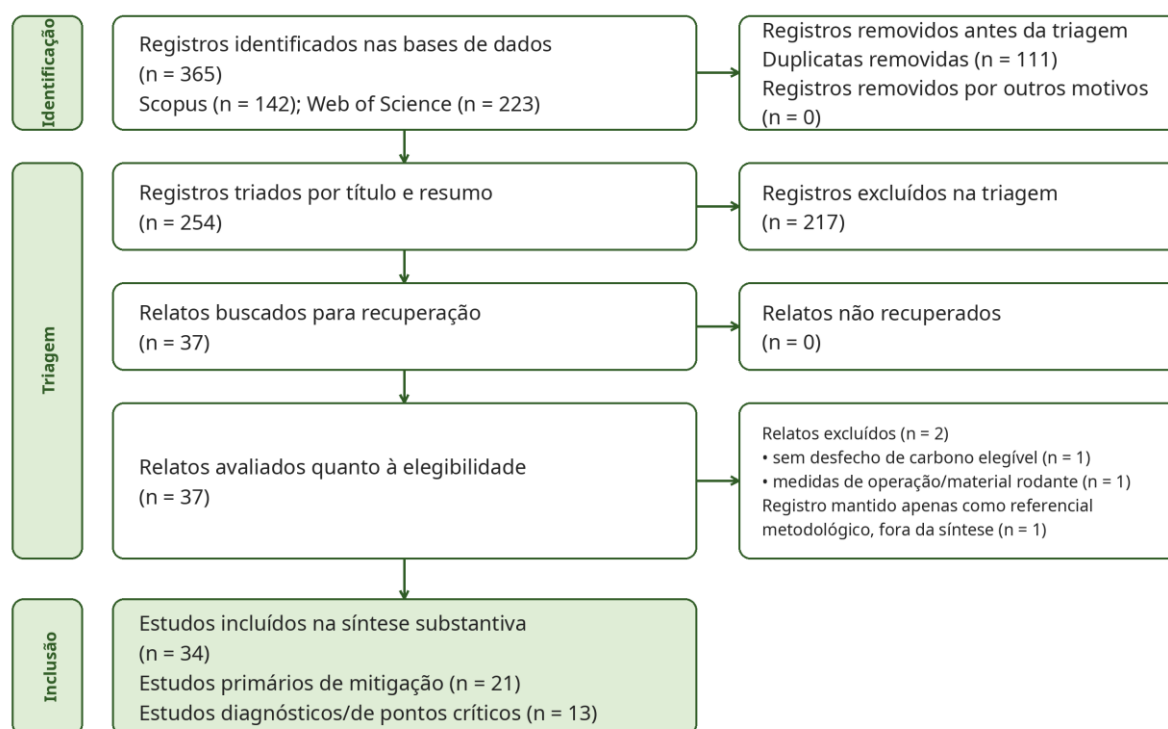
A metanálise quantitativa não seria apropriada porque os estudos utilizaram unidades funcionais, fronteiras de sistema, definições de intervenção, comparadores, escalas de projeto, horizontes temporais e métodos contábeis incompatíveis. As evidências foram, portanto, combinadas por síntese narrativa estruturada e mapa de evidências. Os resultados quantitativos são apresentados com sua linha de base, unidade, unidade funcional, fronteira, situação de cenário e maturidade originais; percentuais não foram agregados, e resultados absolutos não foram convertidos a unidades comuns, salvo quando a própria fonte forneceu a conversão. Não foram conduzidas análises de sensibilidade de nível de revisão nem investigações estatísticas de heterogeneidade. Oito famílias de estratégias foram derivadas das categorias de alavanca de mitigação registradas e das intervenções efetivamente identificadas: (i) materiais de menor carbono e cadeias de suprimento a montante; (ii) circularidade, reúso, reciclagem e prevenção de resíduos; (iii) formas de via, componentes e projeto orientado à vida útil; (iv) otimização estrutural, geométrica e geotécnica; (v) pré-fabricação e inovação em métodos construtivos; (vi) logística e suprimento de obra; (vii) máquinas, combustíveis e eletricidade de canteiro; e (viii) gestão de carbono, ferramentas digitais e contratação.

4 RESULTADOS

4.1 Seleção dos estudos

As buscas retornaram 365 registros (Scopus, n = 142; Web of Science, n = 223). Após a remoção de 111 duplicatas, 254 registros únicos foram triados por título e resumo; 217 foram excluídos, restando 37 relatos buscados e obtidos para avaliação de texto completo. Dois foram excluídos nessa etapa e um foi mantido apenas como referencial metodológico, fora da síntese. A síntese substantiva compreendeu, portanto, 34 estudos: 21 primários de mitigação e 13 diagnósticos ou de pontos críticos. Ao longo dos 37 registros sumarizados foram registradas 167 linhas de medida; as conclusões sobre intervenções restringiram-se às 111 linhas dos estudos primários, e 19 dos 21 estudos primários reportaram ao menos uma redução de carbono quantificada relacionada à construção.

Figura 1. Diagrama de fluxo PRISMA 2020



Fonte: os autores (2026), com base em Page et al. (2021). Bases: Scopus e Web of Science (All Databases, All Collections), consultadas em 21 de abril de 2026.

4.2 Características da base de evidências

Os 34 estudos da síntese substantiva foram publicados entre 2010 e 2025, a maioria a partir de 2020. As evidências concentram-se na China e no Leste Asiático e na Europa (Áustria, Portugal, Itália, Reino Unido, Finlândia, Hungria, Suécia), com estudos adicionais da Índia, dos Estados Unidos, do Brasil, da Turquia, do Irã e da Austrália. Ferrovias de alta velocidade, ferrovias convencionais de carga e passageiros, metrô e sistemas de veículo leve sobre trilhos estão representados, e os ativos vão do subleito e da terraplenagem à superestrutura de via (dormentes, lastro, via em laje, fixações), a túneis, pontes, estações, barreiras acústicas, máquinas de construção e linhas completas. ACV e modelagem de cenários foram os métodos dominantes, com número menor de aplicações de campo, de laboratório e de projetos implantados. Das 111 linhas de medida primárias, 37 eram apenas modeladas, 22 conceituais, 31 implantadas em um ou mais empreendimentos, 12 de laboratório, piloto ou ensaio de campo, seis comercialmente estabelecidas, duas de maturidade mista e uma não reportada. Características selecionadas são sumarizadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Características dos 34 estudos da síntese substantiva

Estudo	País/região	Delineamento	Fronteira	Ativo principal	Papel
Del Serrone, Riccio e Moretti (2025)	Itália	ACV; cenário	Berço ao berço	dormentes; fixações	Primário
Shokri, Mankaa e Traverso (2025)	Alemanha/Europa	ACV; MEF; cenário	Berço ao túmulo	via lastreada; geogrelha	Primário
Chen et al. (2025)	China	laboratório; campo; cenário	NR	subleito estabilizado	Primário
Guo et al. (2025)	China	pegada; cenário; AM	ciclo de vida parcial	rede nacional de AV	Primário
Shinde, Dikshit e Soni (2024)	Índia	ACV de caso; cenário	ciclo de vida parcial	metrô subterrâneo	Diagnóstico
Prokopov et al. (2024)	Suécia	ACV; cenário	NR (horizonte de 100 anos)	formas de via em túnel	Primário
Chen et al. (2023)	China	pegada de caso; comparação	ciclo do material escavado	material escavado e lama	Primário
Silva, Moura e Monteiro (2023)	Portugal	ACV de caso; cenário	berço ao fim de uso	linha e infraestrutura	Diagnóstico
Çeçen, Aktaş e Özbayrak (2023)	Europa (múltiplos)	laboratório; pegada; cenário	apenas matérias-primas	dormentes de concreto	Primário
Wang et al. (2023)	Países da BRI	MRIO; cenário	cadeia de suprimento	cadeias de suprimento	Primário
Aggestam (2023)	NR	ACV; cenário; referencial	etapas selecionadas	sistemas de via	Primário
Koch, Major e Szigeti (2023)	Hungria	pegada; cenário	apenas materiais	fundação por solo-cimento	Primário
Borjigin et al. (2022)	NR	ACV/CCV; gêmeo digital	ciclo completo; sem transporte	via em laje de VLT	Primário
McGarry, Martin e Winslow (2022)	Reino Unido	caso; pegada; referencial	foco em A1–A5	componentes de plataforma	Primário
Chipindula et al. (2022)	Estados Unidos	ACV; cenário	Berço ao túmulo	corredor de AV	Diagnóstico
Herrera Diaz, Scouse e Kelley (2022)	Estados Unidos	ACV; custo pleno	portão ao túmulo	dormentes	Diagnóstico

Estudo	País/região	Delineamento	Fronteira	Ativo principal	Papel
Bischoff e Eberli (2022)	França	caso de projeto; laboratório	NR	segmentos de túnel	Primário
Zhang et al. (2021)	China	ACV de caso; cenário; custo	fim de vida/reciclagem	solo e rocha escavados	Primário
Gulcimen, Aydogan e Uzal (2021)	Turquia	ASCV de caso	Berço ao túmulo	sistema de VLT	Diagnóstico
Abdulkareem et al. (2021)	Finlândia	ACV; campo/piloto; cenário	Berço ao túmulo	barreira acústica	Primário
Landgraf e Horvath (2021)	Áustria	ACV de caso; GEE; cenário	ciclo de vida de rede/via	rede de infraestrutura	Primário
Imteaz, Mohammadinia e Arulrajah (2021)	Austrália	ACV; laboratório; cenário	parcial	sub-lastro de plástico reciclado	Primário
Zeiner et al. (2021)	Áustria/internacional	avaliação de GEE; cenário	NR	máquinas de via	Primário
Cheng et al. (2020)	China	ACV de caso; pegada	etapa de construção	linha de AV e cadeia	Diagnóstico
Lee, Lee e Chun (2020)	Coreia do Sul	inventário de GEE	etapa de construção	infraestrutura de AV	Diagnóstico
Liu et al. (2020)	China	modelo de GEE de caso	etapa de construção	linhas, estações, túneis	Diagnóstico
Kaewunruen, Sresakoolchai e Yu (2020)	China	ACV de caso; cenário	construção + manutenção	túnel e via	Diagnóstico
Liu, Jia e Liu (2019)	Changchun (país NR)	comparação de GEE	etapa de construção	estação de metrô pré-fabricada	Primário
Jones, Moura e Domingos (2017)	Portugal	ACV de caso; cenário	Berço ao túmulo	corredor de AV	Diagnóstico
Bueno, Hoyos e Capellán-Pérez (2017)	Espanha	ACV; cenário	constr. + manut. + operação	linha de AV	Diagnóstico
Andrade e D'Agosto (2016)	Brasil	inventário de GEE de caso	ciclo parcial de 60 anos	sistema metroviário	Diagnóstico
Shojaei, Behfarnia e Mohebi (2015)	Irã	laboratório; otimização; pegada	fabricação do ligante	dormentes de concreto	Primário
Chang e Kendall (2011)	Estados Unidos	ACV; cenário de GEE	berço à construção	infraestrutura de AV	Diagnóstico
Milford e Allwood (2010)	Reino Unido	ACV; cenário	Berço ao túmulo	sistemas de via	Primário

Fonte: os autores (2026). Os números de registro originais são mantidos para rastreabilidade; as lacunas (15, 21 e 31) correspondem a dois relatos excluídos e a um registro metodológico mantido fora da síntese. ACV = avaliação do ciclo de vida; CCV = custeio do ciclo de vida; ASCV = avaliação de sustentabilidade do ciclo de vida; MEF = modelagem por elementos finitos; MRIO = insumo-produto multirregional; AM = aprendizado de máquina; GEE = gases de efeito estufa; AV = alta velocidade; NR = não reportado.

4.3 Pontos críticos de carbono da construção

A produção de materiais foi o ponto crítico mais recorrente. Cimento, concreto e aço de reforço dominaram muitas avaliações de estações, túneis, dormentes e via em laje: o cimento foi o maior ponto crítico individual entre materiais de construção no Metrô do Rio de Janeiro (ANDRADE; D'AGOSTO, 2016); o potencial de aquecimento global de túneis foi atribuído principalmente a concreto e aço (KAEWUNRUEN; SRESAKOOLCHAI; YU, 2020); os impactos de estações subterrâneas foram dominados por concreto e armadura (SHINDE; DIKSHIT; SONI, 2024); e obras civis, particularmente viadutos e pontes, foram fontes

majoritárias na alta velocidade coreana (LEE; LEE; CHUN, 2020) e na alta velocidade da Califórnia (CHANG; KENDALL, 2011). Em escala de produto, a etapa A1–A3 respondeu, em média, por cerca de 79% dos impactos centrais de dormentes de concreto protendido, com o cimento como maior contribuinte (DEL SERRONE; RICCIO; MORETTI, 2025), enquanto os trilhos figuraram como ponto crítico anualizado dominante em sistemas de via alternativos (AGGESTAM, 2023).

A forma da infraestrutura e o traçado influenciaram fortemente as emissões em escala de empreendimento: túneis foram associados a aproximadamente dois terços da pegada construtiva do projeto basco (BUENO; HOYOS; CAPELLÁN-PÉREZ, 2017) e estações subterrâneas representaram cerca de 70% dos impactos de infraestrutura no caso de Mumbai (SHINDE; DIKSHIT; SONI, 2024); porte da estação, profundidade de implantação e configuração de traçado apareceram como determinantes de fase de planejamento (LIU et al., 2020). Logística e energia de construção foram secundárias em muitas ACV de produto, mas decisivas em casos específicos: A4–A5 contribuíram com cerca de 9% e o transporte rodoviário com cerca de 7% para dormentes (DEL SERRONE; RICCIO; MORETTI, 2025), ao passo que o transporte de matérias-primas respondeu por cerca de 16% do potencial de aquecimento global do berço ao túmulo em uma avaliação de veículo leve sobre trilhos (GULCIMEN; AYDOGAN; UZAL, 2021), e o transporte de longa distância e a disposição em aterro foram centrais na linha de base de material escavado por tuneladora (CHEN et al., 2023). A energia operacional dominou alguns resultados de ciclo de vida completo de ferrovias de passageiros (JONES; MOURA; DOMINGOS, 2017; CHIPINDULA et al., 2022; SILVA; MOURA; MONTEIRO, 2023); esses resultados foram utilizados apenas para explicar por que uma medida construtiva pode representar parcela modesta das emissões totais de ciclo de vida e ainda assim ser relevante para a gestão do carbono incorporado.

4.4 Estratégias de mitigação

As 111 linhas de intervenção dos estudos primários foram mapeadas em oito famílias de estratégias de nível superior. Cada linha foi atribuída uma única vez; a contagem de estudos reflete estudos primários únicos que contribuem para cada família, de modo que um estudo que aborde várias famílias é contado em cada uma delas (Tabela 1).

Tabela 1 - Distribuição das 111 linhas de intervenção primária entre as oito famílias de estratégias

Família de estratégia	Estudos primários (n)	Linhas de medida (n)	Escopo principal
Materiais de menor carbono e cadeias de suprimento a montante	10	18	ligantes, cimento, aço, eletricidade, cadeias industriais
Circularidade, reúso, reciclagem e prevenção de resíduos	10	17	material escavado, agregados reciclados, recuperação de aço e de componentes
Formas de via, componentes e projeto orientado à vida útil	10	27	tipo de via, dormentes, trilhos, fixações, vida útil associada à manutenção
Otimização estrutural, geométrica e geotécnica	10	15	minimização de material, estruturas, traçado, geometria de estação, subleito
Pré-fabricação e inovação em métodos construtivos	6	10	estações e componentes pré-fabricados, métodos de tunelamento e de montagem
Logística e suprimento de obra	2	2	modo de transporte, distância de transporte, suprimento local
Máquinas, combustíveis e eletricidade de canteiro	5	11	energia de canteiro, eficiência de máquinas, equipamentos livres de fósseis
Gestão de carbono, ferramentas digitais e contratação	3	11	linhas de base de carbono, referenciais de contratação, apoio digital à decisão
Total de linhas de medida primárias	21	111	—

Fonte: os autores (2026). A contagem de estudos supera 21 porque um mesmo estudo pode contribuir com medidas para mais de uma família.

4.4.1 Materiais de menor carbono e cadeias de suprimento a montante

As medidas de material e de cadeia de suprimento foram as mais consistentemente evidenciadas e mostraram-se mais robustas quando havia linha de base convencional e quantidade definida. Para dormentes, o concreto de escória álcali-ativada otimizado reduziu as emissões de produção do ligante de 350 para 249 kg CO₂/m³, cerca de 28,9%, atendendo aos requisitos de resistência, ainda que a fronteira se limitasse à fabricação do ligante (SHOJAEI; BEHFARNIA; MOHEBI, 2015). A redução da dosagem de cimento e o uso de cimento pozolânico em dormente com reforço laminado de CFRPU reduziram o CO₂eq de matérias-primas em cerca de 54% em média, variando aproximadamente de 50% a 77% conforme a eletricidade empregada (ÇEÇEN; AKTAŞ; ÖZBAYRAK, 2023), e um “cenário verde” combinado para dormentes, associando cimento alternativo, eletricidade mais limpa e transferência de frete rodoviário para ferroviário, alcançou redução de 18% a 19% em A1–C4, sem isolamento das contribuições individuais (DEL SERRONE; RICCIO; MORETTI, 2025). Em terraplenagem, alterações de ligante em colunas de solo-cimento reduziram as emissões do lado dos materiais entre cerca de 25% e mais de 50% (KOCH; MAJOR; SZIGETI, 2023), e filito estabilizado in situ com 3,5% de cimento apresentou-se cerca de 30% inferior à brita importada (CHEN et al., 2025).

Em escala de empreendimento, peças pré-moldadas de plataforma de menor carbono efetivamente implantadas situaram-se cerca de 48% a 51% abaixo da linha de base (McGARRY; MARTIN; WINSLOW, 2022). A montante, cenários nacionais e multinacionais reportaram valores muito superiores, até cerca de 42% a 90% para atualização tecnológica da cadeia de suprimento (WANG et al., 2023) e 38,8 MtCO₂, aproximadamente 3,9% do cenário tendencial, para aço, cimento e eletricidade de menor carbono na alta velocidade chinesa até 2060 (GUO et al., 2025), mas esses valores representam modernização da economia como um todo, e não tecnologia de canteiro.

4.4.2 Circularidade, reúso, reciclagem e prevenção de resíduos

As medidas circulares mostraram-se mais relevantes onde a construção gerou grandes fluxos de material escavado ou componentes substituíveis. A reciclagem integrada, no próprio canteiro, do material escavado por tuneladora evitou cerca de 4.240 t CO₂ ao suprimir transporte e disposição (CHEN et al., 2023); o reúso de solo e rocha escavados e de aço retirado de serviço contribuiu com reduções adicionais e créditos de fim de vida em escala de rede (GUO et al., 2025); e agregados reciclados, concreto de dormentes triturados e recuperação de aço geraram benefícios do módulo D (DEL SERRONE; RICCIO; MORETTI, 2025). Misturas de sub-lastro com plástico reciclado reportaram cerca de 11,7 kg CO₂eq/t frente a uma linha de base de aterro, condicionadas a controle de adequação ambiental e de desempenho (IMTEAZ; MOHAMMADINIA; ARULRAJAH, 2021). O reúso mostrou-se sistematicamente restringido pela qualidade do material, pela existência de destinos locais e por limites técnicos de substituição, por exemplo, concreto de dormente reciclado limitado a cerca de 10%.

4.4.3 Formas de via, componentes e projeto orientado à vida útil

A seleção de formas de via de menor impacto e o prolongamento da vida de componentes podem reduzir a demanda inicial de material e o encargo de renovação, mas os benefícios mostraram-se sensíveis à vida útil e ao tráfego. Um pacote otimizado de via não lastreada em túnel alcançou cerca de 10% de redução nas emissões de 100 anos em relação à via convencional (PROKOPOV et al., 2024). Comparações entre sistemas de via alternativos mostraram que o peso relativo de concreto, armadura e trilhos depende fortemente do projeto da laje e da anualização adotada (AGGESTAM, 2023). Cenários primários de mitigação indicaram que o prolongamento da vida útil de trilhos, fixações e via produz efeitos isolados pequenos, que podem tornar-se significativos de forma cumulativa em redes e horizontes de várias décadas (GUO et al., 2025; MILFORD; ALLWOOD, 2010). Evidências diagnósticas identificaram decisões de vida útil como variáveis relevantes de planejamento, sem que fossem tratadas como prova direta de efetividade (SHINDE; DIKSHIT; SONI, 2024).

4.4.4 Otimização estrutural, geométrica e geotécnica

Eliminar material por meio de vigas e infraestruturas otimizadas, configurações mais leves de via em laje, geometria eficiente de estações e estabilização adequada de subleito reduziu a demanda na origem. Estimativas de cenário nacional atribuíram várias megatoneladas de potencial à otimização de vigas, mesoestruturas e tipologia de via na alta velocidade chinesa (GUO et al., 2025), e porte de estação, profundidade e otimização de traçado foram identificados como decisões de alta alavancagem na fase de planejamento (LIU et al., 2020). As evidências mostraram-se mais sólidas quando a minimização de material esteve vinculada a verificação explícita de desempenho, e não presumida.

4.4.5 Pré-fabricação e inovação em métodos construtivos

A pré-fabricação e as mudanças de método reduziram emissões e resíduos de canteiro. Uma estação de metrô pré-fabricada alcançou redução de 12,59% na etapa de construção, com extensão unitária declarada e comparação baseada em processos (LIU; JIA; LIU, 2019); segmentos de revestimento de túnel reforçados com fibras de aço foram associados a reduções superiores a 10.000 t CO₂ em um grande empreendimento de tunelamento (BISCHOFF; EBERLI, 2022); e o maior emprego de tunelamento por escudo e de lajes de via e arcos invertidos pré-fabricados reduziu impactos de canteiro em cenários nacionais (GUO et al., 2025).

4.4.6 Logística e suprimento de obra

Apenas duas linhas de medida dedicadas à logística foram identificadas, em dois estudos primários. No estudo de dormentes, a substituição de frete rodoviário por ferroviário integrou o “cenário verde” combinado e foi discutida como opção de menor impacto, mas sua contribuição isolada em A1–C4 não foi quantificada (DEL SERRONE; RICCIO; MORETTI, 2025). A avaliação da infraestrutura austríaca considerou transporte e suprimento no âmbito de cenários mais amplos de rede e de via (LANDGRAF; HORVATH, 2021). Estudos diagnósticos identificaram, adicionalmente, distância de transporte e origem dos materiais como pontos críticos relevantes (SHINDE; DIKSHIT; SONI, 2024; GULCIMEN; AYDOGAN; UZAL, 2021), sem que fossem tratados como evidência direta de efetividade logística. Fatores de carga, retornos vazios, acesso a frete ferroviário e distâncias específicas do empreendimento foram frequentemente não reportados ou decisivos.

4.4.7 Máquinas, combustíveis e eletricidade de canteiro

Esta família reuniu eletricidade de menor carbono em cenários combinados de produto (DEL SERRONE; RICCIO; MORETTI, 2025; ÇEÇEN; AKTAŞ; ÖZBAYRAK, 2023), cenários energéticos de escala de rede e de ativo (LANDGRAF; HORVATH, 2021), trajetórias para máquinas de via permanente livres de combustíveis fósseis (ZEINER et al., 2021) e mudanças de equipamento ou de energia de canteiro associadas à construção pré-fabricada (LIU; JIA; LIU, 2019). A direção e a magnitude do benefício dependeram da intensidade de carbono local da eletricidade e dos combustíveis, da utilização dos equipamentos e da fronteira do sistema. Evidências diagnósticas identificaram energia de equipamentos e eletricidade como pontos críticos potenciais, sem servir de prova direta de efetividade (SHINDE; DIKSHIT; SONI, 2024). Diversas propostas de máquinas careceram de resultado de CO₂eq de ciclo de vida diretamente comparável a uma linha de base a diesel e são, portanto, mais bem interpretadas como trajetórias modeladas ou recomendações do que como reduções universalmente demonstradas.

4.4.8 Gestão de carbono, ferramentas digitais e contratação

As medidas habilitadoras não reduzem emissões necessariamente de forma direta; elas criam processos para selecionar, especificar e verificar intervenções físicas. As evidências incluíram tomada de decisão de ciclo de vida apoiada por gêmeos digitais (BORJIGIN et al., 2022), programas de especificação e contratação de concreto de menor carbono (McGARRY; MARTIN; WINSLOW, 2022) e referenciais de contabilização e planejamento de carbono em escala de rede (LANDGRAF; HORVATH, 2021). O valor desses habilitadores reside, portanto, em governança, rastreabilidade e comparação precoce de alternativas de projeto, e não em uma redução atribuível de forma independente.

4.5 Resultados de mitigação quantificados

As evidências quantificadas mostraram-se heterogêneas demais para uma estimativa agregada ou um ordenamento universal; os resultados referiram-se à fabricação do ligante, a matérias-primas, a etapas de produto, a A1–C4, a sistemas do berço ao túmulo, a construção somada à renovação ou a cenários nacionais cumulativos, com unidades funcionais que vão de kg CO₂eq/m³ e kg CO₂eq/t a kg CO₂/(m·ano), t CO₂eq por estação e MtCO₂ ao longo de décadas. Resultados representativos, mantidos em seu contexto contábil original, são sumarizados no Quadro 3; devem ser lidos com sua fronteira e maturidade e não podem ser comparados diretamente.

Quadro 3 - Resultados quantificados ilustrativos dos estudos primários de mitigação

Medida (estudo)	Tipo	Redução reportada	Fronteira	Ressalva
Concreto de escória álcali-ativada para dormentes (Shojaei, Behfarnia e Mohebi, 2015)	Laboratório	≈ 28,9% (350→249 kg CO ₂ /m ³)	fabricação do ligante	apenas o ligante; não é ACV completa do dormente
Peças pré-moldadas de plataforma de menor carbono (McGarry, Martin e Winslow, 2022)	Implantada	≈ 48–51% abaixo da linha de base	cálculo de componente; fronteira NR	projeto e material alterados em conjunto
Estação de metrô pré-fabricada (Liu, Jia e Liu, 2019)	Implantada	12,59%	etapa de construção	empreendimento único
Segmentos de túnel reforçados com fibras de aço (Bischoff e Eberli, 2022)	Implantada	> 10.000 t CO ₂ evitadas	estimativa de projeto; fronteira NR	detalhamento de inventário incompleto
Reciclagem integrada de material escavado por escudo (Chen et al., 2023)	Implantada	≈ 4.240 t CO ₂ evitadas	comparação de projeto; fronteira NR	unidade funcional não plenamente declarada
Dormente com reforço laminado de CFRPU (Çeçen, Aktaş e Özbayrak, 2023)	Laboratório/ modelo	≈ 50–77% de CO ₂ eq de matérias-primas	matérias-primas	dependente da eletricidade; medida combinada
“Cenário verde” combinado para dormentes (Del Serrone, Riccio e Moretti, 2025)	Modelo	18–19% de PAG em A1–C4	A1–C4	três intervenções combinadas
Via não lastreada otimizada em túnel (Prokopov et al., 2024)	Modelo	≈ 10% (horizonte de 100 anos)	berço ao túmulo	pacote, e não medida isolada
Ligantes alternativos em colunas de solo-cimento (Koch, Major e Szigeti, 2023)	Modelo	≈ 25% a > 50% do lado dos materiais	materiais	unidade funcional e módulos não declarados
Escalonamento de geogrelhas recicladas em 100 km (Shokri, Mankaa e Traverso, 2025)	Modelo	8.200 t CO ₂ eq evitadas	cenário	cenário prospectivo de escala
Via embutida em cenário futuro da rede britânica (Milford e Allwood, 2010)	Modelo	até ≈ 40% ao ano	via anualizada	dependente do tráfego
Atualização tecnológica da cadeia de suprimento (Wang et al., 2023)	Modelo	≈ 42–90%	MRIO de escala econômica	não é tecnologia de canteiro

Fonte: os autores (2026). Os valores não são diretamente comparáveis e não foram agregados.

4.6 Qualidade metodológica e confiança

Nenhum estudo substantivo recebeu classificação de alta confiança na avaliação de extração. Entre os 21 estudos primários de mitigação, 20 foram classificados como de confiança moderada e um como de baixa confiança; entre os 13 estudos diagnósticos, três foram moderados e dez, baixos. A confiança moderada refletiu, em geral, comparador, unidade funcional e fronteira claros, valores de cenário transparentes ou aplicação ferroviária direta, permanecendo limitadas a incerteza ou a transferibilidade. As fragilidades recorrentes foram intervenções combinadas, evidências apenas modeladas, fatores de emissão secundários, inventários confidenciais ou indisponíveis e análise de incerteza limitada.

O tratamento formal de incerteza apareceu em apenas uma minoria dos estudos, incluindo análise de Monte Carlo (SHOKRI; MANKAA; TRAVERSO, 2025; ZHANG et al., 2021) e sensibilidade a premissas de vida útil ou de sistema (PROKOPOV et al., 2024; MILFORD; ALLWOOD, 2010); isso importa porque matriz elétrica, fator do cimento, distância de transporte, vida útil, frequência de substituição e regras de alocação podem alterar tanto a magnitude quanto a direção dos resultados.

4.7 Compensações, cobenefícios e barreiras de implementação

Menor carbono não implicou, de forma consistente, menor impacto em todas as categorias. O cenário combinado de dormentes reduziu o potencial de aquecimento global, mas aumentou os impactos de resíduos perigosos e de material particulado, em grande parte em razão do conjunto de dados do cimento alternativo (DEL SERRONE; RICCIO; MORETTI, 2025); uma barreira acústica de geopolímero com menor potencial de aquecimento global na produção poderia perder sua vantagem de ciclo de vida caso a vida útil ou a resistência fossem insuficientes (ABDULKAREEM et al., 2021); e insumos reciclados exigiram controle de adequação e de desempenho, com limites técnicos de substituição (IMTEAZ; MOHAMMADINIA; ARULRAJAH, 2021; DEL SERRONE; RICCIO; MORETTI, 2025). As barreiras incluíram normas, desempenho estrutural, durabilidade, consistência de materiais, disponibilidade de suprimento, infraestrutura de recuperação, acesso ferroviário, infraestrutura de recarga ou de hidrogênio e intensidade de carbono da eletricidade. Onde o custo foi discutido, ele tanto pôde favorecer a adoção, como no caso do sub-lastro reciclado, quanto permanecer como restrição não resolvida. As evidências favorecem, portanto, decisões multicritério, e não a seleção baseada exclusivamente em carbono.

4.8 Lacunas de evidência

Quatro lacunas se destacam. A primeira é a contabilização inconsistente: A1–A5 raramente foi reportado de forma consistente, A4 e A5 foram frequentemente agregados ou omitidos e unidades funcionais padronizadas para construção ferroviária estiveram ausentes. A segunda é a atribuição limitada por intervenção: cenários combinados são comuns e muitos estudos diagnósticos propõem medidas sem quantificá-las. A terceira é a maturidade das evidências: medidas modeladas e conceituais predominaram, avaliações replicadas em escala real foram escassas, as máquinas careceram de CO₂eq de ciclo de vida comparativo ao diesel e a logística permaneceu subevidenciada. A quarta é incerteza e transferibilidade: premissas regionais de eletricidade, aço, cimento, transporte e vida útil foram frequentemente decisivas, enquanto análise probabilística, avaliação econômica, validação de durabilidade e evidências de contratação em nível de empreendimento permaneceram incompletas.

Cabe destacar que as evidências brasileiras identificadas foram diagnósticas, e não específicas de intervenção, o que reforça a necessidade de fatores de emissão regionais e de estudos de caso completos de obras nacionais.

5 DISCUSSÃO

5.1 Principais achados

A resposta à QP1 (estratégias avaliadas ou propostas para reduzir as emissões de CO₂eq) é um portfólio, e não uma tecnologia isolada: as intervenções abrangem materiais, circularidade, projeto de via e estrutural, pré-fabricação, logística, máquinas e energia e sistemas de gestão de carbono, com as estratégias de material e de cadeia de suprimento mais consistentemente representadas, porque cimento, concreto e aço recorrem em todos os ativos. Quanto à QP2 (principais ativos, etapas construtivas, materiais e processos), os principais alvos são a produção de materiais, as estruturas civis subterrâneas e elevadas, os componentes de via permanente, a terraplenagem e os ciclos de substituição; mesmo quando os resultados de ciclo de vida completo são dominados pela operação, a construção permanece um espaço de decisão distinto quanto ao carbono incorporado. Quanto à QP3 (reduções quantificadas e respectivos contextos metodológicos), 19 estudos primários reportaram ao menos uma redução quantificada, mas os valores não podem ser agregados: afirmações mais fortes são possíveis para comparações claramente definidas (ligante álcali-ativado para dormentes, produtos de material escavado reciclado, estação de metrô pré-fabricada, comparação de formas de via em túnel e redimensionamento de peças de plataforma), ao passo que grandes percentuais nacionais refletem premissas amplas. Quanto à QP4 (maturidade e solidez metodológica), a maturidade das evidências é a principal restrição: a maioria das medidas foi modelada, conceitual ou de empreendimento único, e nenhum estudo alcançou alta confiança. Quanto à QP5 (condições de implementação e transferibilidade), a transferibilidade depende de desempenho estrutural e geotécnico, durabilidade, matriz elétrica, produção de cimento e aço, distância de transporte, acesso à logística ferroviária, qualidade dos materiais, capacidade de processamento de resíduos, normas, regime de manutenção e escala. Quanto à QP6 (pontos críticos, lacunas e prioridades para o planejamento ferroviário brasileiro), as prioridades são o reporte padronizado de A1–A5, a separação explícita de A4 e A5, a atribuição por intervenção, dados regionais de emissão, estudos comparativos de máquinas e de logística e a validação em escala real.

5.2 Uma hierarquia de oportunidades de mitigação

As evidências sugerem uma hierarquia provisória de decisão, e não um ordenamento universal. Primeiro, estabelecer uma linha de base de carbono de construção cedo o bastante para influenciar traçado, tipologia estrutural, profundidade de estação, forma de via, balanço de terraplenagem e contratação, pois os estudos diagnósticos mostram que essas decisões determinam onde reside o encargo dominante. Segundo testar evitação e eficiência material antes da substituição, por meio de otimização estrutural, redução de espessuras, espaçamento de fixações, geometria eficiente de estações, menor dosagem de ligante e vidas úteis coordenadas, sempre vinculadas à verificação de desempenho. Terceiro, aplicar sistemas de materiais de menor carbono às quantidades remanescentes, incluindo ligantes alternativos, concretos com elevado teor de adições, aço de menor emissão, combustíveis secundários e eletricidade mais limpa. Quarto, desenvolver ciclos circulares para solo e rocha escavados, lastro, trilhos, dormentes, concreto, vidro e plástico. Quinto, otimizar logística e energia de canteiro conforme as distâncias e a infraestrutura locais. Medidas voltadas a emissões residuais, como captura de carbono ou compensações, não devem deslocar a redução direta e mostraram-se apenas fracamente sustentadas nesta base de evidências. Essa sequência evitar–reduzir–substituir–circular–otimizar constitui um referencial interpretativo derivado pelos autores a partir dos padrões revisados, e não foi testada como hierarquia pelos estudos incluídos.

5.3 Aplicação de metodologias de ACV ao planejamento ferroviário brasileiro

O achado mais relevante para o caso brasileiro não é um percentual de redução, e sim uma constatação sobre o momento da decisão. Nas evidências revisadas, a maior parte do carbono de construção fica determinada por escolhas tomadas antes do projeto executivo: traçado e extensão de obras de arte especiais, tipologia estrutural, profundidade e porte de estações, forma de via e balanço de corte e aterro (LIU et al., 2020; BUENO; HOYOS; CAPELLÁN-PÉREZ, 2017; SHINDE; DIKSHIT; SONI, 2024). No ciclo brasileiro de desenvolvimento de empreendimentos ferroviários, esse momento corresponde aos estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental e ao licenciamento prévio, e não à fase de execução. A implicação prática é que a ACV precisa ser mobilizada como instrumento de planejamento, e não apenas como verificação a posteriori de obras já definidas.

Uma segunda implicação diz respeito à especificação metodológica mínima para que estudos brasileiros sejam comparáveis entre si e com a literatura internacional. A revisão sugere um conjunto reduzido de escolhas que deveriam ser explicitadas em qualquer aplicação nacional:

- a) declarar a unidade funcional de forma dupla, combinando uma unidade de ativo (por quilômetro de linha, por estação, por metro de via) a uma unidade de serviço anualizada, de modo a permitir comparação entre tipologias com vidas úteis distintas;
- b) reportar separadamente os módulos A1–A3, A4 e A5, porque A4 depende diretamente das distâncias e dos modos efetivos de suprimento de cada empreendimento;
- c) declarar a vida útil considerada e o regime de renovação, uma vez que os benefícios de formas de via e de componentes se mostraram fortemente sensíveis a essas premissas;
- d) manter os créditos do módulo D reportados à parte, sem incorporação ao resultado de construção;
- e) documentar a origem dos fatores de emissão, distinguindo dados nacionais de dados importados, e submeter os parâmetros dominantes a análise de sensibilidade.

A terceira implicação é a mais delicada e decorre diretamente da heterogeneidade documentada: os percentuais internacionais não são transferíveis ao Brasil sem reexame. A matriz elétrica brasileira apresentou 88,2% de fontes renováveis em 2024 (EPE, 2025), de modo que medidas centradas na eletricidade de canteiro podem produzir ganhos marginais diferentes daqueles observados em sistemas elétricos mais intensivos em carbono. O *roadmap* do cimento brasileiro estimou fator clínquer médio de 68% em 2014 e trajetória de redução para 52% em 2050 (SNIC; ABCP, 2019), o que também exige recalcular, com dados nacionais e especificações reais, os benefícios da substituição de ligantes. Para o transporte, não se adota uma premissa nacional: o módulo A4 deve refletir as distâncias, os modos e as cargas efetivas de cada projeto. A circularidade de solo e rocha escavados permanece particularmente relevante porque a revisão identificou reduções expressivas em cenários que reaproveitaram esses materiais (CHEN et al., 2023; ZHANG et al., 2021). Como hipótese dos autores a ser testada em estudos de caso brasileiros, eficiência material, otimização de traçado e circularidade da terraplenagem podem preceder, em determinadas obras, a substituição de ligantes e a descarbonização da energia de canteiro.

A quarta implicação é institucional. As medidas classificadas como habilitadoras, exigência de contabilização de carbono em editais, programas de especificação de concreto de menor carbono e fluxos de trabalho baseados em modelagem da informação da construção (BIM) e gêmeos digitais, foram justamente aquelas que, na literatura, converteram medidas físicas isoladas em prática rotineira e auditável (McGARRY; MARTIN; WINSLOW, 2022; BORJIGIN et al., 2022; LANDGRAF; HORVATH, 2021). No arranjo brasileiro, esses instrumentos podem ser incorporados às especificações técnicas, aos critérios de sustentabilidade das contratações e às obrigações definidas em editais e contratos. O regime de autorização ferroviária amplia o universo de empreendimentos em que essas exigências podem ser previstas, mas não substitui a necessidade de critérios técnicos explícitos de contabilização (BRASIL, 2021).

Por fim, a viabilidade dessa aplicação depende de infraestrutura de dados. O SICV Brasil oferece inventários de produtos e processos nacionais (IBICT, 2024), mas a ausência de estudos primários de mitigação em obras ferroviárias brasileiras exige que cada aplicação documente a representatividade temporal, geográfica e tecnológica dos fatores empregados e identifique explicitamente o uso de dados estrangeiros. A prioridade, portanto, é produzir inventários aderentes aos materiais e processos ferroviários e estudos de caso completos, com dados medidos em empreendimentos em implantação. Sem essa base, a ACV corre o risco de operar no país como exercício de conformidade documental, e não como instrumento efetivo de decisão.

5.4 Transferibilidade e contexto geográfico

Como as evidências se concentram na China e na Europa, e como os resultados dependem de eletricidade, produção de materiais e logística locais, percentuais específicos não devem ser transferidos acriticamente para outros contextos. A mesma intervenção pode ser benéfica em um contexto e neutra ou adversa em outro, o que se ilustra pela sensibilidade das barreiras de geopolímero à vida útil e pelo desempenho dependente de tráfego da via embutida. Fatores de emissão e estudos de caso regionalmente fundamentados, por exemplo no Brasil e em outras regiões sub-representadas, são necessários antes que recomendações específicas de contexto possam ser formuladas com confiança.

5.5 Limitações da base de evidências

Os estudos incluídos são metodologicamente heterogêneos: unidades funcionais, fronteiras e fatores de emissão diferem, diversas intervenções são combinadas, a análise de incerteza é pouco frequente e muitas reduções são modeladas, e não medidas. Alguns dependem de inventários confidenciais ou de matrizes elétricas específicas de região, que podem não ser transferíveis. Estudos diagnósticos estabelecem onde agir, mas não que uma medida funcione, e menor carbono nem sempre significa menor impacto em todas as categorias.

5.6 Limitações da revisão

Diversas limitações de nível de revisão devem ser registradas. A busca limitou-se a Scopus e Web of Science (All Databases, All Collections) e empregou expressão booleana relativamente estreita, centrada em CO₂, Rail/Railway e construction. Não foram conduzidas busca dedicada em literatura cinzenta, busca manual em periódicos ou rastreamento de citações, de modo que estudos relevantes que utilizem terminologia ou canais de publicação distintos podem ter sido omitidos.

A revisão não foi registrada e nenhum protocolo foi elaborado ou publicado previamente, limitando a proteção contra alterações metodológicas posteriores. O viés de reporte por resultados ausentes não foi avaliado formalmente. Por fim, a avaliação crítica utilizou esquema estruturado não validado, adaptado a evidências heterogêneas de ACV e de cenários, e não um instrumento formal de risco de viés. Essas limitações reforçam a necessidade de tratar percentuais específicos como dependentes de contexto e de interpretar a síntese no nível de direção e de padrão, e não de magnitude comparativa precisa.

5.7 Agenda de pesquisa

As prioridades são: reporte padronizado e transparente quanto à fronteira do carbono de construção, com unidades funcionais e módulos harmonizados e separação explícita de A4 e A5; maior disponibilidade de dados medidos de obra executada, complementando cenários modelados; quantificação das interações entre alavancas e dos efeitos de pacotes, em vez de medidas isoladas; estudos comparativos de ciclo de vida de máquinas e de logística; ampliação da cobertura geográfica, particularmente de programas ferroviários de países de renda baixa e média; análise de custo de ciclo de vida, de durabilidade e de incerteza probabilística; e modelos integrados de empreendimento que conectem terraplenagem, estruturas, estações, via, logística e energia de construção, em vez de otimizar componentes isolados. Para o Brasil, acrescenta-se a construção de fatores de emissão nacionais para insumos ferroviários e a condução de ao menos um estudo de caso completo, com dados primários de obra, em corredor em implantação.

6 CONCLUSÃO

A construção de infraestrutura ferroviária pode representar componente substancial do carbono de ciclo de vida e constitui domínio de decisão distinto e de curto prazo, mesmo quando a operação domina a pegada total. Esta revisão teve por objetivo examinar como metodologias de ACV vêm sendo aplicadas à avaliação e à redução das emissões de CO₂eq dessa etapa e discutir suas condições de aplicação ao planejamento ferroviário brasileiro.

Metodologicamente, a revisão sistemática reportada com referência ao PRISMA 2020 recuperou 365 registros, triou 254, avaliou 37 em texto completo e incorporou 34 estudos à síntese substantiva (21 primários de mitigação e 13 diagnósticos), dos quais se extraíram 111 linhas de intervenção primária, organizadas em oito famílias de estratégias por síntese narrativa estruturada.

Quanto aos resultados, as famílias mais consistentemente representadas envolveram sistemas de materiais de menor carbono, projeto estrutural e de via eficiente em material, reúso circular de materiais escavados e de demolição, métodos pré-fabricados ou construtivos aprimorados e energia de canteiro de menor carbono. Nenhum estudo substantivo alcançou alta confiança, a maioria das evidências foi modelada, combinada ou baseada em empreendimento único, e a heterogeneidade de unidades funcionais e de fronteiras impediu qualquer agregação quantitativa ou ordenamento universal.

Conclui-se que essas medidas devem ser tratadas como portfólio e incorporadas precocemente por meio de projeto, especificação e contratação, seguindo a hierarquia provisória evitar–reduzir–substituir–circular–otimizar. Para o Brasil, a contribuição principal da revisão é delimitar as condições dessa aplicação: a ACV precisa ser mobilizada na fase de estudos de viabilidade e de licenciamento, quando o traçado, a tipologia estrutural e o balanço de terraplenagem ainda são decidíveis; as escolhas metodológicas mínimas precisam ser explicitadas para garantir comparabilidade; e a hierarquia de medidas eficaz no país deve ser recalculada com o perfil da matriz elétrica, o fator clínquer do cimento nacional e as distâncias e os modos de suprimento específicos de cada empreendimento. Como as evidências brasileiras identificadas foram exclusivamente diagnósticas, a consolidação desse instrumental depende de inventários representativos e de estudos de caso de escala real em obras nacionais, sem os quais a ACV tende a operar como exercício documental, e não como instrumento efetivo de decisão de planejamento.

DECLARAÇÕES

Registro e protocolo. Esta revisão não foi registrada e nenhum protocolo foi publicado previamente.

Financiamento. Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflitos de interesse. Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Contribuição dos autores. P.I.A.R.: conceituação, metodologia, triagem, extração de dados, análise formal e redação inicial. A.C.M.B.: supervisão, metodologia, revisão e edição. P.C.M.S.: supervisão, validação, revisão e edição.

Disponibilidade de dados. A base estruturada de extração é mantida pelos autores. Solicitações de acesso podem ser dirigidas ao autor correspondente.

REFERÊNCIAS

- ABDULKAREEM, M.; HAVUKAINEN, J.; NUORTILA-JOKINEN, J.; HORTTANAINEN, M. Life cycle assessment of a low-height noise barrier for railway traffic noise. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 323, 129169, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129169>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Novos projetos ferroviários**. Brasília, DF: ANTT, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/novos-projetos-ferroviarios>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- AGGESTAM, E. Comparison of the dynamic response and environmental impact between traditional and innovative railway track systems. **International Journal of Rail Transportation**, Abingdon, v. 11, n. 5, p. 685-704, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23248378.2022.2099992>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- ANDRADE, C. E. S. de; D'AGOSTO, M. de A. Energy use and carbon dioxide emissions assessment in the lifecycle of passenger rail systems: the case of the Rio de Janeiro Metro. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 126, p. 526-536, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.094>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2025a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2025b.
- BISCHOFF, J.-L.; EBERLI, M. Grand Paris Express Lot 16: sustainable infrastructure development in Paris. **Geomechanics and Tunneling**, Berlin, v. 15, n. 6, p. 767-773, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/geot.202200060>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- BORJIGIN, A. O.; SRESAKOOLCHAI, J.; KAEWUNRUEN, S.; HAMMOND, J. Digital twin aided sustainability assessment of modern light rail infrastructures. **Frontiers in Built Environment**, Lausanne, v. 8, 796388, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.796388>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- BRASIL. Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Resolução nº 4, de 15 de dezembro de 2010. Dispõe sobre a aprovação do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 4 jan. 2011. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=113998>. Acesso em: 21 abr. 2026.

BRASIL. Lei nº 14.273, de 23 de dezembro de 2021. Dispõe sobre as Ferrovias Brasileiras e institui o regime de autorização ferroviária. Brasília, DF: Presidência da República, 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14273.htm. Acesso em: 21 abr. 2026.

BUENO, G.; HOYOS, D.; CAPELLÁN-PÉREZ, I. Evaluating the environmental performance of the high speed rail project in the Basque Country, Spain. **Research in Transportation Economics**, Amsterdam, v. 62, p. 44-56, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2017.02.004>. Acesso em: 21 abr. 2026.

ÇEÇEN, F.; AKTAŞ, B.; ÖZBAYRAK, A. Decarbonization of the concrete railway sleeper production: bringing the low-dosage pozzolanic cement usage in the sleeper production via novel laminated CFRPU reinforcement technique. **Materials Today Sustainability**, Amsterdam, v. 23, 100455, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100455>. Acesso em: 21 abr. 2026.

CHANG, B.; KENDALL, A. Life cycle greenhouse gas assessment of infrastructure construction for California's high-speed rail system. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Amsterdam, v. 16, n. 6, p. 429-434, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.04.004>. Acesso em: 21 abr. 2026.

CHEN, A.; QI, W.; DU, Q.; HOU, S.; YUAN, G.; MA, Z.; PENG, L.; WANG, T. Laboratory and field evaluation of cement-stabilized phyllite for sustainable railway subgrades. **Buildings**, Basel, v. 15, n. 17, 3151, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings15173151>. Acesso em: 21 abr. 2026.

CHEN, G.; LI, W.; YANG, F.; CAO, T.; WU, Z.; LU, Y.; WU, C. Study on resourceful treatment and carbon reduction intensity of metro shield slag: an example of a tunnel interval of Shenzhen Line 13. **Buildings**, Basel, v. 13, n. 11, 2816, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings13112816>. Acesso em: 21 abr. 2026.

CHENG, S.; LIN, J.; XU, W.; YANG, D.; LIU, J.; LI, H. Carbon, water, land and material footprints of China's high-speed railway construction. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Amsterdam, v. 82, 102314, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102314>. Acesso em: 21 abr. 2026.

CHIPINDULA, J.; DU, H.; BOTLAGUDURU, V. S. V.; CHOE, D.; KOMMALAPATI, R. R. Life cycle environmental impact of a high-speed rail system in the Houston-Dallas I-45 corridor. **Public Transport**, Berlin, v. 14, n. 2, p. 481-501, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12469-021-00264-2>. Acesso em: 21 abr. 2026.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021**: sustainability of construction works: environmental product declarations: core rules for the product category

of construction products. Brussels: CEN, 2021.

DEL SERRONE, G. D.; RICCIO, G.; MORETTI, L. Cradle-to-cradle life cycle assessment of railway prestressed concrete sleepers: a state-of-the-art review and strategies for reducing environmental impacts. **Resources, Conservation & Recycling**, Amsterdam, v. 214, 108020, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108020>. Acesso em: 21 abr. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2025**: relatório síntese, ano base 2024. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>. Acesso em: 21 abr. 2026.

FERNÁNDEZ, P. M.; SANCHÍS, I. V.; FRANCO, R. I.; YEPES, V. Slab track optimization using metamodels to improve rail construction sustainability. **Journal of Construction Engineering and Management**, Reston, v. 148, n. 7, 04022053, 2022. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002288](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002288). Acesso em: 21 abr. 2026.

GULCIMEN, S.; AYDOGAN, E. K.; UZAL, N. Life cycle sustainability assessment of a light rail transit system: integration of environmental, economic, and social impacts. **Integrated Environmental Assessment and Management**, Hoboken, v. 17, n. 5, p. 1070-1082, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ieam.4428>. Acesso em: 21 abr. 2026.

GUO, G.; ZHU, C.; MAO, R.; LI, X.; WU, Y.; CHEN, J. Decarbonizing high-speed rail infrastructure in China: an integrated assessment combining machine learning and scenario modeling to 2060. **Energy**, Amsterdam, v. 341, 139478, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139478>. Acesso em: 21 abr. 2026.

HERRERA DIAZ, M. A.; SCOUSE, A.; KELLEY, S. S. Environmental full cost accounting of alternative materials used for railroad ties: treated-wood and concrete case study. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 364, 132536, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132536>. Acesso em: 21 abr. 2026.

IMTEAZ, M.; MOHAMMADINIA, A.; ARULRAJAH, A. Environmental suitability, carbon footprint and cost savings of recycled plastic for railway applications. **International Journal of Sustainable Engineering**, Abingdon, v. 14, n. 4, p. 725-734, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19397038.2021.1929551>. Acesso em: 21 abr. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Sobre a ACV**. Brasília, DF: Ibict, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ibict/pt-br/acesso-a->

[informacao/perguntas-frequentes/sobre-a-acv](#). Acesso em: 21 abr. 2026.

JONES, H.; MOURA, F.; DOMINGOS, T. Life cycle assessment of high-speed rail: a case study in Portugal. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Berlin, v. 22, n. 3, p. 410-422, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1177-7>. Acesso em: 21 abr. 2026.

KAEWUNRUEN, S.; SRESAKOOLCHAI, J.; YU, S. Global warming potentials due to railway tunnel construction and maintenance. **Applied Sciences**, Basel, v. 10, n. 18, 6459, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10186459>. Acesso em: 21 abr. 2026.

KOCH, E.; MAJOR, Z.; SZIGETI, C. Investigating the ecological footprint of deep mixing. **Chemical Engineering Transactions**, Milano, v. 107, p. 349-354, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3303/CET23107059>. Acesso em: 21 abr. 2026.

LANDGRAF, M.; HORVATH, A. Embodied greenhouse gas assessment of railway infrastructure: the case of Austria. **Environmental Research: Infrastructure and Sustainability**, Bristol, v. 1, n. 2, 025008, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac1242>. Acesso em: 21 abr. 2026.

LEE, J.; LEE, C.; CHUN, Y. Greenhouse gas emissions from high-speed rail infrastructure construction in Korea. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Amsterdam, v. 87, 102514, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102514>. Acesso em: 21 abr. 2026.

LIU, M.; JIA, S.; LI, P.; LIU, X.; ZHANG, Y. Predicting GHG emissions from subway lines in the planning stage on a city level. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 259, 120823, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120823>. Acesso em: 21 abr. 2026.

LIU, M.; JIA, S.; LIU, X. Evaluation of mitigation potential of GHG emissions from the construction of prefabricated subway station. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 236, 117700, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117700>. Acesso em: 21 abr. 2026.

McGARRY, H.; MARTIN, B.; WINSLOW, P. Delivering low carbon concrete for Network Rail on the routemap to net zero. **Case Studies in Construction Materials**, Amsterdam, v. 17, e01343, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01343>. Acesso em: 21 abr. 2026.

MILFORD, R. L.; ALLWOOD, J. M. Assessing the CO2 impact of current and future rail track in the UK. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Amsterdam, v. 15, n. 2,

p. 61-72, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.09.003>. Acesso em: 21 abr. 2026.

MINTZIA, D.; KEHAGIA, F.; TSAKALIDIS, A.; ZERVAS, E. A methodological framework for the comparative analysis of the environmental performance of roadway and railway transport. **Promet: Traffic & Transportation**, Zagreb, v. 30, n. 6, p. 721-731, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.7307/ptt.v30i6.2804>. Acesso em: 21 abr. 2026.

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, London, v. 372, n71, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>. Acesso em: 21 abr. 2026.

PROKOPOV, A.; OLSSON, B. A.; FAMUREWA, S. M.; RANTATALO, M. Selection of track form in railway tunnel from a life cycle analysis perspective. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, Berlin, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13198-024-02423-7>. Acesso em: 21 abr. 2026.

RUNGSKUNROCH, P.; SHEN, Z.; KAEWUNRUEN, S. Benchmarking environmental and economic impacts from the HSR networks considering life cycle perspectives. **Environmental Impact Assessment Review**, Amsterdam, v. 90, 106608, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106608>. Acesso em: 21 abr. 2026.

SHINDE, A. M.; DIKSHIT, A. K.; SONI, A. Environmental life cycle assessment of underground metro rail: a case study in Mumbai Metropolitan Region, India. **Environmental Impact Assessment Review**, Amsterdam, v. 106, 107501, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107501>. Acesso em: 21 abr. 2026.

SHOJAEI, M.; BEHFARNIA, K.; MOHEBI, R. Application of alkali-activated slag concrete in railway sleepers. **Materials and Design**, Amsterdam, v. 69, p. 89-95, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.12.051>. Acesso em: 21 abr. 2026.

SHOKRI, M.; MANKAA, R. N.; TRAVERSO, M. Geo-environmental analysis and mechanical properties of geosynthetics in railway components industry (sub and superstructures). **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 501, 145366, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145366>. Acesso em: 21 abr. 2026.

SILVA, T. R. da; MOURA, B.; MONTEIRO, H. Life cycle assessment of current Portuguese railway and future decarbonization scenarios. **Sustainability**, Basel, v. 15, n. 14, 11355, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su151411355>. Acesso em: 21 abr. 2026.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Roadmap tecnológico do cimento**: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC; ABCP, 2019. Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/publicacoes/roadmap-tecnologico-do-cimento-brasil-ebook/>. Acesso em: 21 abr. 2026.

WANG, X.; MENG, J.; LIU, M.; BI, J. Carbon footprint of railway projects under the Belt and Road Initiative and the future low-carbon pathways. **Earth's Future**, Washington, DC, v. 11, n. 12, e2023EF003972, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2023EF003972>. Acesso em: 21 abr. 2026.

ZEINER, M.; LANDGRAF, M.; KNABL, D.; ANTONY, B.; CÁRDENAS, V. B.; KOCZWARA, C. Assessment and recommendations for a fossil free future for track work machinery. **Sustainability**, Basel, v. 13, n. 20, 11444, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su132011444>. Acesso em: 21 abr. 2026.

ZHANG, N.; ZHANG, H.; SCHILLER, G.; FENG, H.; GAO, X.; LI, E.; LI, X. Unraveling the global warming mitigation potential from recycling subway-related excavated soil and rock in China via life cycle assessment. **Integrated Environmental Assessment and Management**, Hoboken, v. 17, n. 3, p. 639-650, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ieam.4376>. Acesso em: 21 abr. 2026.