

ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE ASFALTOS COM ADIÇÃO DE BORRACHA DE PNEUS

LIFE CYCLE ANALYSIS OF ASPHALTS WITH THE ADDITION OF TIRE RUBBER

Érica Laís Laurindo Silveira¹

Laiana Ferreira da Costa²

RESUMO

A pavimentação asfáltica pode gerar impactos ambientais significativos devido ao alto consumo de recursos naturais e emissões associadas ao seu ciclo produtivo. Nesse contexto, a incorporação de materiais reciclados na sua cadeia produtiva, como a borracha de pneus, tem sido estudada como uma alternativa sustentável. Este estudo teve como objetivo analisar a viabilidade ambiental do uso da borracha de pneus como aditivo em asfalto, por meio da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Para isso, foram analisadas as propriedades físicas e mecânicas de asfaltos com diferentes teores de borracha, com base em dados da literatura, e posteriormente foi conduzida uma ACV na abordagem “*cradle to gate*”, quantificando entradas e saídas ambientais por meio de inventários construídos a partir de dados secundários obtidos em revisões bibliográficas e em bancos de dados. A modelagem do ciclo de vida foi feita por meio do software *OpenLCA*. A análise de impactos ambientais incluiu categorias como emissões de gases de efeito estufa, consumo energético e geração de resíduos. Por fim, os resultados obtidos foram comparados com asfaltos convencionais para determinar os benefícios e desafios ambientais da reutilização da borracha de pneus. Em termos quantitativos, o asfalto modificado apresentou menores valores absolutos de impacto ambiental quando comparado ao convencional, com redução de 21,2% no potencial de aquecimento global no cenário com 20% de borracha em relação ao ligante asfáltico convencional, além de uma diminuição de aproximadamente 28,9% no esgotamento de recursos fósseis, bem como reduções observadas em outras categorias de impacto ambiental avaliadas. Concluiu-se que a incorporação da borracha de pneus no asfalto resulta em um desempenho ambiental superior quando comparado ao asfalto convencional, destacando-se pela significativa redução no potencial de aquecimento global.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida; asfalto modificado; sustentabilidade; pavimentação; ligantes asfálticos; resíduos sólidos; economia circular; avaliação de impacto ambiental; *cradle to gate*.

ABSTRACT

Asphalt paving can generate significant environmental impacts due to the high consumption of natural resources and emissions associated with its production cycle. In this context, the incorporation of recycled materials into its production chain, such as tire rubber, has been studied as a sustainable alternative. This study aimed to analyze the environmental viability of using tire rubber as an additive in asphalt, using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. To this end, the physical and

¹ Bacharelada em Engenharia Civil pela Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2025.

² Doutora em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande, 2023.

mechanical properties of asphalts with different rubber contents were analyzed, based on literature data, and subsequently an LCA was conducted using the "cradle to gate" approach, quantifying environmental inputs and outputs through inventories constructed from secondary data obtained in literature reviews and databases. Life cycle modeling was performed using the OpenLCA software. The environmental impact analysis included categories such as greenhouse gas emissions, energy consumption, and waste generation. Finally, the results obtained were compared with conventional asphalts to determine the environmental benefits and challenges of reusing tire rubber. In quantitative terms, the modified asphalt showed lower absolute values of environmental impact when compared to conventional asphalt, with a 21.2% reduction in global warming potential in the scenario with 20% rubber compared to conventional asphalt binder, as well as a decrease of approximately 28.9% in the depletion of fossil resources, and reductions observed in other environmental impact categories evaluated. It was concluded that the incorporation of tire rubber into asphalt results in superior environmental performance when compared to conventional asphalt, standing out for the significant reduction in global warming potential.

Keywords: life cycle assessment; modified asphalt; Sustainability; paving; asphalt binders; solid waste; circular economy; environmental impact assessment; cradle to gate.

INTRODUÇÃO

A noção de desenvolvimento sustentável começou a se destacar com a divulgação do Relatório de Brundtland pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 1991, como uma resposta aos efeitos negativos do modelo econômico e social adotado à época.

Em uma evolução desse conceito, a ONU estabeleceu em 2015 a Agenda 2030, que, por meio dos seus 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), detalha uma visão integrada para o futuro, abrangendo as dimensões social, ambiental, econômica e institucional em escala global. Já Sachs (2002) enfatiza a necessidade de uma abordagem integrada que leve em conta as interações entre os diversos setores da sociedade.

Além disso, Rockström *et al.* (2009) ressaltam a importância de respeitar os limites ecológicos do planeta para garantir a continuidade do desenvolvimento a longo prazo. Assim, o desenvolvimento sustentável não apenas considera os impactos imediatos das atividades humanas, mas também propõe estratégias que assegurem benefícios às futuras gerações (Elkington, 1997; Sachs, 2002; Rockström *et al.*, 2009).

O rápido crescimento das redes rodoviárias tem sido um fenômeno global, impulsionado pela necessidade de conectividade e desenvolvimento econômico. No entanto, esse crescimento traz consigo preocupações significativas em relação aos impactos ambientais e à sustentabilidade dos projetos de pavimentação. A construção de rodovias frequentemente resulta na fragmentação de habitats, perda de biodiversidade e aumento das emissões de gases de efeito estufa, além de alterar os padrões de drenagem natural, o que pode levar a impactos negativos nos ecossistemas locais (Forman *et al.*, 2003).

Para minimizar esses efeitos, é fundamental que os projetos rodoviários incorporem práticas sustentáveis, como a utilização de materiais ambientalmente responsáveis, a adoção de estratégias de mitigação dos impactos ecológicos e a consideração de critérios ambientais desde a fase inicial de planejamento. A incorporação de critérios sustentáveis, como o uso de materiais reciclados, a redução da pegada de carbono (FHWA, 2014) e a implementação de medidas de mitigação ambiental (Forman *et al.*, 2003), não apenas minimizam esses impactos, mas também promovem a eficiência econômica e a responsabilidade ecológica.

A produção de asfalto-borracha, que utiliza borracha de pneu inservível e é feita em altas temperaturas, é uma alternativa que contribui para a redução do descarte inadequado de resíduos e para a melhoria do desempenho do pavimento. Conforme esclarecem Maia *et al.* (2023), no processo via úmida, o ligante asfáltico é modificado pela borracha antes de ser misturado aos agregados. Essa modificação resulta em um novo ligante com desempenho superior, que melhora a resistência do pavimento à fadiga e à deformação permanente (Rosa *et al.*, 2023; Prazeres *et al.*, 2024). Tais benefícios, que aumentam a durabilidade e reduzem custos de manutenção futuros, consolidam o asfalto-borracha como uma alternativa mais sustentável e economicamente viável a longo prazo.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) surge como uma ferramenta essencial para mensurar os impactos ambientais, econômicos e sociais associados aos projetos de diversos setores, incluindo os de infraestrutura viária, oferecendo uma visão abrangente desde a extração de matérias-primas até o descarte final (Guinée *et al.*, 2011). Segundo os autores, a ACV permite quantificar efeitos como consumo de energia, emissão de poluentes e geração de resíduos, subsidiando decisões mais sustentáveis. Além disso, Rebitzer *et al.* (2004) destacam que a aplicação da ACV em processos produtivos e de gestão auxilia na identificação de oportunidades para prevenção da poluição, redução do consumo de recursos e melhoria da eficiência ambiental, contribuindo para decisões mais sustentáveis na indústria e em políticas públicas.

Os estudos sobre Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) passaram por uma evolução significativa desde a década de 1990, mas, como apontado por Finnveden *et al.* (2009), a metodologia ainda enfrentava desafios relacionados à falta de padronização e à inconsistência nos dados. A normatização internacional, especialmente as normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, estabeleceu diretrizes claras para a definição de escopo, análise de inventário e avaliação de impactos (ABNT, 2009a; 2009b). Segundo Guinée *et al.*

(2011), essa padronização aumentou a credibilidade da ACV e facilitou sua adoção em setores como infraestrutura e gestão de resíduos.

Além disso, Krau *et al.* (2021) em sua revisão sistemática sobre ACV na pavimentação asfáltica, ressaltam que a metodologia tem sido amplamente aceita pela indústria rodoviária para medir e avaliar o desempenho ambiental de materiais e processos ao longo da vida útil do pavimento, com foco na identificação da intensidade de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE).

A metodologia utilizada na ACV contribui para a identificação de oportunidades de melhoria, como o uso de materiais reciclados e a adoção de tecnologias de baixo impacto ambiental (FHWA, 2014). Portanto, a aplicação da ACV na pavimentação não apenas preenche lacunas de conhecimento, mas também promove a integração de critérios ambientais no planejamento e execução de projetos rodoviários.

Nesse contexto, embora diversos estudos tenham investigado o desempenho e as vantagens do asfalto-borracha sob diferentes perspectivas, observa-se que a maioria deles não se concentra especificamente na avaliação ambiental do ligante. Farina *et al.* (2017), por exemplo, realizaram uma Análise do Ciclo de Vida (ACV) do pavimento como um todo, cujo revestimento era composto por uma mistura asfáltica contendo borracha de pneus, enquanto Lo Presti (2013) apresentou uma revisão abrangente sobre o asfalto-borracha, abordando suas propriedades técnicas e mecânicas, mas sem aplicar a metodologia de ACV. Por outro lado, pesquisas mais recentes, como as de Piao *et al.* (2022) e Siverio Lima *et al.* (2022), efetivamente aplicaram a ACV em sistemas que envolvem misturas ou ligantes modificados com borracha, contribuindo para o avanço da avaliação ambiental desses materiais. Contudo, observa-se que a maior parte desses estudos ainda considera um conjunto restrito de categorias de impacto, concentrando-se principalmente em emissões de gases de efeito estufa e consumo de energia. Categorias igualmente relevantes, como

toxicidade humana, ecotoxicidade, acidificação e eutrofização, raramente são contempladas, o que limita a compreensão dos possíveis *trade-offs* ambientais (isto é, as compensações ou perdas e ganhos entre diferentes impactos) associados ao uso da borracha em ligantes asfálticos. É justamente nessa lacuna que se insere a presente pesquisa, ao buscar uma análise mais detalhada e abrangente do perfil ambiental desses materiais.

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo comparativo entre dois tipos de asfalto: o asfalto tradicional e o asfalto com adição de borracha de pneus, com foco na avaliação dos impactos ambientais ao longo de seu ciclo de vida. Utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), buscou-se quantificar e comparar indicadores como emissões de gases de efeito estufa, consumo de energia e geração de resíduos, incluindo todas as etapas, desde a extração de matérias-primas, considerando a abordagem “*Cradle-to-gate*”.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Asfalto Borracha

O asfalto-borracha representa uma inovação significativa na engenharia, integrando borracha de pneus reciclados na cadeia produtiva da pavimentação. Esta tecnologia não apenas oferece uma alternativa sustentável para a destinação de um tipo de resíduo sólido urbano, mas também aprimora as propriedades mecânicas e de desempenho dos pavimentos. A crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental e a necessidade de infraestruturas mais duráveis impulsionam a adoção do asfalto-borracha em projetos rodoviários (Mendes, 2019; Ferreira, 2019).

A principal característica do asfalto-borracha reside na sua composição, que utiliza pó de borracha proveniente de pneus inservíveis. Essa abordagem contribui diretamente para a redução do descarte inadequado desses resíduos no meio ambiente, um problema global de grande escala (Ferreira, 2019). Além do impacto ambiental positivo, a incorporação da borracha confere ao ligante

asfálticos propriedades superiores em comparação com o asfalto convencional, resultando em diversos benefícios:

- **Maior Durabilidade e Vida Útil:** a adição de borracha aumenta a resistência do asfalto a deformações permanentes, como a trilha de roda, e à formação de trincas por fadiga. Isso prolonga significativamente a vida útil do pavimento, reduzindo a necessidade de manutenções frequentes e, conseqüentemente, minimizando os custos a longo prazo (Mendes, 2019; Ferreira, 2021).
- **Melhor Desempenho Estrutural:** o asfalto-borracha apresenta maior elasticidade e flexibilidade, o que melhora a capacidade do pavimento de absorver tensões e resistir a variações de temperatura. Essa característica é crucial para a longevidade da infraestrutura em diferentes condições climáticas (Ferreira, 2021; Akodedjro, 2024).
- **Redução de Ruído:** pavimentos construídos com asfalto-borracha tendem a ser mais porosos (ECORODOVIAS, 2020), o que contribui para a redução do ruído gerado pelo tráfego de veículos. Essa propriedade é particularmente benéfica em áreas urbanas, melhorando o conforto acústico para as comunidades próximas às vias (Ferreira, 2021; Akodedjro, 2024).
- **Segurança Aprimorada:** a maior aderência e a capacidade de drenagem do pavimento construído com o uso do asfalto-borracha podem reduzir o risco de aquaplanagem, tornando as vias mais seguras para os motoristas, especialmente em condições de chuva intensa (Ecorodovias, 2020).

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia sistemática e abrangente utilizada para quantificar os impactos ambientais associados a um produto, processo ou serviço ao longo de todas as etapas de sua

existência. (ABNT NBR ISO 14040:2009; ABNT NBR ISO 14044:2009). De acordo com Finnveden *et al.* (2009), essa ferramenta vai além, ao analisar os impactos ambientais potenciais e o uso de recursos de forma integrada, considerando aspectos do meio ambiente, da saúde humana e do consumo de recursos naturais. Uma das suas principais contribuições é a capacidade de evitar a transferência de problemas entre as fases do ciclo de vida, o que subsidia a tomada de decisões mais sustentáveis.

Fases da ACV

Conforme as normas ABNT NBR ISO 14040 (2009) e ABNT NBR ISO 14044 (2009), a ACV é estruturada em quatro fases principais e interdependentes:

- **Definição do Objetivo e Escopo:** Nesta fase inicial, são estabelecidos o propósito do estudo, o sistema a ser analisado, a unidade funcional (base para a comparação dos sistemas), os limites do sistema (fronteiras) e as categorias de impacto ambiental a serem consideradas (ABNT, 2009a).
- **Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV):** Consiste na coleta e quantificação de todos os dados de entrada (recursos naturais, energia, materiais) e saída (emissões para o ar, água e solo, resíduos) relacionados a cada etapa do ciclo de vida do produto ou processo dentro dos limites definidos (ABNT, 2009a).
- **Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV):** Nesta fase, os dados de inventário são traduzidos em impactos ambientais potenciais. Utilizam-se modelos e fatores de caracterização para converter as quantidades de substâncias emitidas ou recursos consumidos em indicadores de impacto ambiental, como potencial de aquecimento global, acidificação, eutrofização, entre outros (ABNT, 2009a).

- **Interpretação dos Resultados:** É a fase final, onde os resultados das fases anteriores são analisados criticamente em relação ao objetivo e escopo do estudo. Inclui a identificação de pontos críticos, a avaliação da sensibilidade e da incerteza, e a formulação de conclusões e recomendações (ABNT, 2009a).

Abordagens do Ciclo de Vida

A ACV pode ser aplicada utilizando diferentes abordagens de fronteira do sistema, dependendo do objetivo do estudo:

- **Cradle-to-Gate (Do Berço ao Portão):** analisa o ciclo de vida de um produto desde a extração das matérias-primas (“berço”) até o momento em que o produto final deixa o portão da fábrica. Este tipo de estudo inclui a aquisição de matéria-prima, transporte e fabricação, mas exclui as fases de distribuição, uso pelo consumidor e descarte final (Curran, 2011).
- **Cradle-to-Grave (Do Berço ao Túmulo):** examina os impactos ambientais de um produto ao longo de todo o seu ciclo de vida. A análise começa na extração das matérias-primas (“berço”), continua através da produção, distribuição e uso, e termina com a gestão do fim de vida do produto, seja por meio de reciclagem, reutilização ou descarte final em aterro (“túmulo”) (Curran, 2011).
- **Cradle-to-Cradle (Do Berço ao Berço):** Uma abordagem que vai além do descarte, focando na circularidade. O produto, ao final de sua vida útil, é projetado para ser reutilizado, reciclado ou compostado, tornando-se matéria-prima para um novo ciclo, eliminando o conceito de resíduo (McDonough; Braungart, 2002).

Categorias de Impacto, Midpoint e Endpoint

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é a fase da ACV que visa quantificar e avaliar os impactos ambientais

potenciais de um produto ou serviço. A ABNT NBR ISO 14044 (2009) (ABNT, 2009) estabelece que a AICV deve incluir a seleção de categorias de impacto, a classificação e a caracterização, conectando os dados de inventário (emissões e consumos) aos impactos ambientais por meio de uma cadeia de causa e efeito.

Além da estrutura definida pela norma, os métodos de AICV podem quantificar os impactos em dois níveis principais: ponto médio (*midpoint*) e ponto final (*endpoint*).

A abordagem de *midpoint* quantifica os impactos em um estágio intermediário da cadeia de causa e efeito, focando nos problemas ambientais específicos. As categorias de impacto representam áreas de preocupação ambiental, como mudanças climáticas, acidificação ou eutrofização (Cavalett *et al.*, 2012).

A abordagem de *endpoint* agrega os resultados de diversas categorias de *midpoint* para estimar o dano final, considerando as chamadas áreas de proteção, como saúde humana, qualidade dos ecossistemas e disponibilidade de recursos (Cavalett *et al.*, 2012).

Avaliação do Ciclo de Vida na Pavimentação

A indústria da pavimentação, historicamente associada a um alto consumo de recursos naturais e impactos ambientais significativos, tem buscado ativamente soluções mais sustentáveis. Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) emerge como uma ferramenta indispensável para mensurar e gerenciar esses impactos, subsidiando decisões mais conscientes e eficientes (Santero *et al.*, 2011; FHWA, 2014).

A aplicação da ACV em projetos de pavimentação permite uma análise holística, desde a extração de matérias-primas até o descarte ou reciclagem do pavimento. Essa abordagem é crucial para identificar pontos

críticos de impacto ambiental, como emissões de gases de efeito estufa (GEE), consumo de energia e recursos, e geração de resíduos

Estudos na literatura demonstram que a ACV é poderosa para influenciar decisões na indústria da pavimentação. Santero *et al.* (2011) ressaltam que a fase de produção dos materiais e a fase de construção frequentemente representam grande parcela dos impactos ambientais. A FHWA (2014), por sua vez, enfatiza que os resultados variam conforme o escopo do estudo e as condições locais, e recomenda a padronização metodológica para que comparações sejam consistentes.

Sobre os insumos da pavimentação, Santero *et al.* (2011) afirmam que apesar do cimento e do ligante serem os contribuintes mais significativos na fase de extração e produção de materiais, a precisão de seus valores ambientais nunca é discutida com detalhes suficientes nas ACVs de pavimentos existentes.

A incorporação de materiais reciclados, como a borracha de pneus e o RAP, é apontada como uma medida promissora, embora deva ser avaliada considerando contextos específicos. O desenvolvimento de ferramentas e diretrizes práticas, conforme relatado pela FHWA (2014), tem tornado a análise de ciclo de vida mais acessível e integrada ao processo de planejamento e projeto de pavimentos.

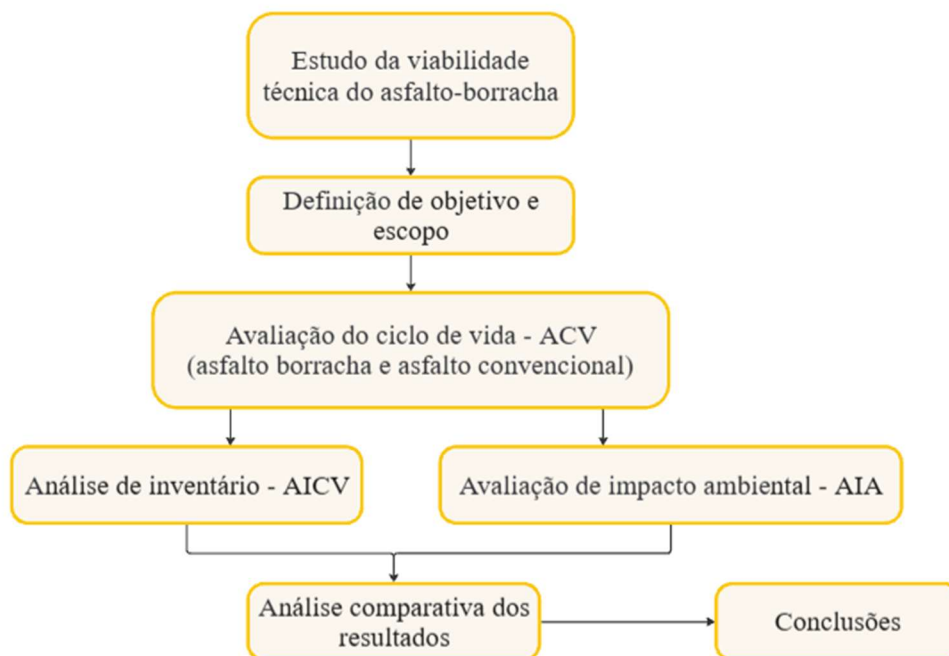
Esses resultados reforçam que a ACV é um instrumento essencial para impulsionar a sustentabilidade e a inovação na indústria da pavimentação, fornecendo a base científica para decisões ambientalmente responsáveis (Santero *et al.*, 2011; FHWA, 2014).

METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma abordagem metodológica sistemática, dividida em etapas sequenciais, conforme ilustrado na Figura 1, apresenta-se um

fluxograma representativo das etapas metodológicas adotadas neste estudo.

Figura 1: Fluxograma representativo da metodologia adotada.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Este estudo foi conduzido com base na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), seguindo as diretrizes das normas ABNT NBR ISO 14040 (2009a) e ABNT NBR ISO 14044 (2009b).

Estudo da viabilidade técnica do asfalto-borracha

Esta etapa consistiu na busca e análise da literatura científica sobre a viabilidade técnica do asfalto-borracha. Foram consultados artigos científicos, teses, dissertações, livros e relatórios técnicos que abordassem as propriedades físicas e mecânicas de ligantes asfálticos modificados com borracha de pneus. O foco foi em estudos comparativos entre o cimento asfáltico de petróleo (CAP) puro e o CAP modificado com a adição de borracha de pneus, avaliando seu desempenho. Adicionalmente, foram investigados os limites e especificações técnicas estabelecidos pelas normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de

Transportes (DNIT) pertinentes a esses materiais.

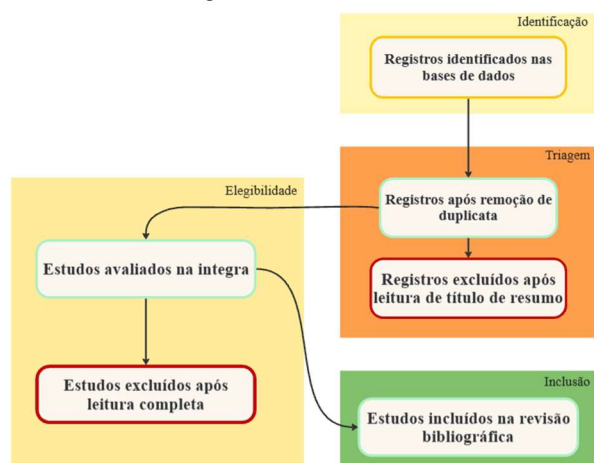
A coleta de dados foi realizada em bases de dados acadêmicos reconhecidos, como *Web of Science*, *ScienceDirect*, *Google Scholar*, entre outras, utilizando termos de busca, tais como “asfalto-borracha”, “cimento asfáltico com adição borracha”, “*bitumen rubber*”, “*asphalt rubber*”, “*tire rubber asphalt*”, “propriedades mecânicas CAP”.

O objetivo desta etapa foi consolidar as informações existentes sobre a performance técnica desse material.

As buscas realizadas nas bases *Web of Science*, *ScienceDirect* e *Google Scholar* resultaram em um número elevado de registros. Após a remoção de duplicatas e a leitura de títulos e resumos, foram excluídos grande parte dos trabalhos por não se enquadrarem no escopo da pesquisa ou por não apresentarem dados técnicos relevantes. Em seguida, realizou-se a leitura completa dos estudos potencialmente elegíveis, entre artigos

científicos, teses, dissertações e relatórios técnicos, que fundamentaram a análise das propriedades físicas e mecânicas dos ligantes asfálticos modificados com borracha de pneus. O processo de identificação, triagem e seleção dos estudos é apresentado por meio de um fluxograma adaptado do método PRISMA, ilustrado na figura 2.

Figura 2 – Fluxograma do processo de identificação, triagem e seleção dos estudos.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Embora a revisão bibliográfica tenha identificado um conjunto mais amplo de publicações sobre as propriedades de asfaltos modificados com borracha de pneus, a análise detalhada da viabilidade técnica concentrou-se em dois estudos principais, a saber, Alsheyab et al. (2023) e Pinheiro (2004). Essa escolha decorreu, primeiramente, da limitada disponibilidade de trabalhos que avaliassem teores de borracha próximos aos utilizados neste estudo, especificamente 10% e 20%. Adicionalmente, os referidos estudos apresentaram resultados experimentais que atenderam aos limites e às especificações técnicas estabelecidos pelas normas vigentes, o que os tornou adequados como referência para a comparação do desempenho do cimento asfáltico de petróleo (CAP) puro e do CAP modificado. Dessa forma, a seleção desses trabalhos assegurou consistência técnica,

aderência normativa e coerência com os objetivos da presente pesquisa.

Avaliação do ciclo de vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi conduzida seguindo rigorosamente as diretrizes estabelecidas pelas normas ABNT NBR ISO 14040 (2009a) e ABNT NBR ISO 14044 (2009b), que fornecem a estrutura e os requisitos para a realização de estudos de ACV. A aplicação dessas normas garante a padronização e a comparabilidade dos resultados obtidos. A seguir, são detalhadas as fases da ACV no contexto desta pesquisa:

Definição de objetivo e escopo

Os ligantes avaliados estão descritos na Tabela 1. A Unidade Funcional adotada foi de 1 kg de ligante asfáltico produzido (pronto para uso).

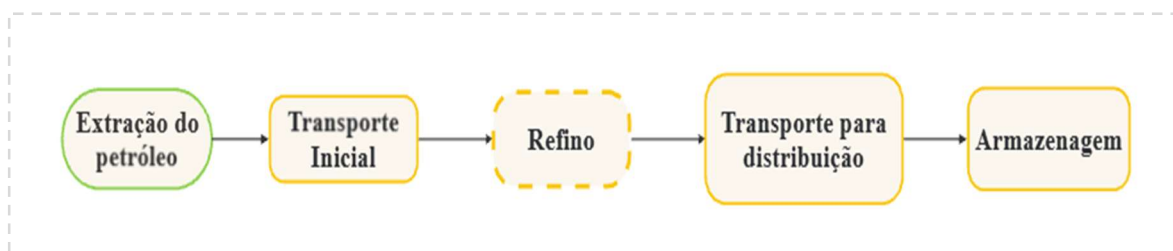
Tabela 1: Ligantes asfálticos avaliados.

Nomenclatura adotada	Teor de borracha
P0	0% de borracha (CAP puro)
P10	10% de borracha
P20	20% de borracha

Fonte: Elaborado pela própria autora.

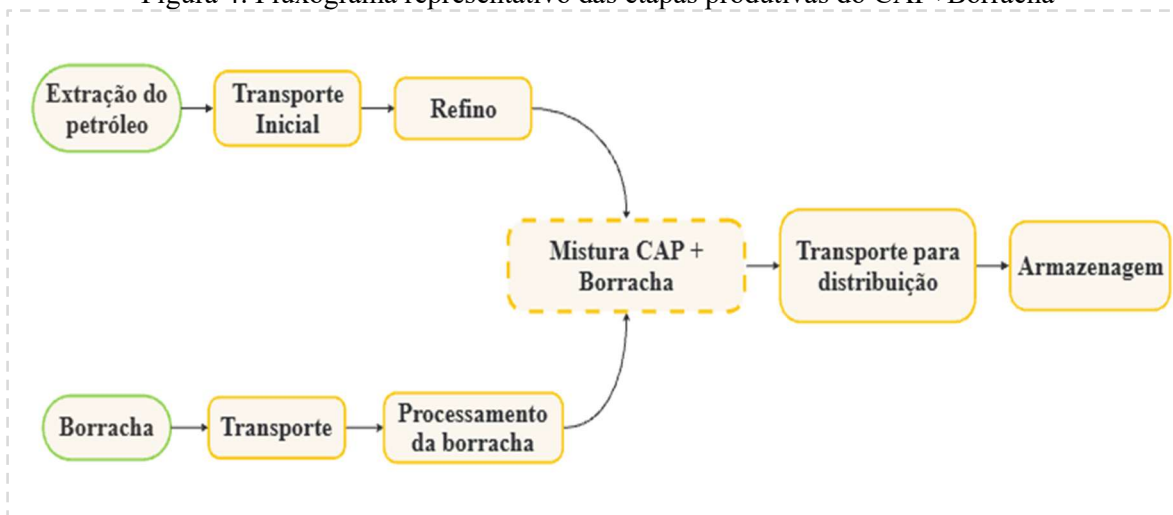
A abrangência e Fronteiras do Sistema inclui a extração de matérias-primas, processamento da borracha, produção do ligante e transportes. Exclui construção, uso e fim de vida do pavimento. As Figuras 3 e 4 delimitam as fronteiras do sistema (*berço ao portão*).

Figura 3: Fluxograma representativo das etapas produtivas do CAP convencional.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 4: Fluxograma representativo das etapas produtivas do CAP+Borracha



Fonte: Elaborado pela própria autora.

As premissas adotadas foram as seguintes:

- Transporte marítimo para petróleo importado (distância média de transporte igual a 500km);
- Transporte rodoviário para distribuição (distância média de transporte igual a 200km);
- Processo de modificação a 160°C com homogeneização mecânica.

A escolha por focar exclusivamente nos ligantes deve-se a dois fatores críticos:

- I. Diferença composicional: A única variação entre os produtos analisados reside na substituição parcial do CAP por borracha reciclada, empregando o processo via úmida.
- II. Custo energético do processo: A incorporação da borracha exige etapas adicionais, como trituração, aquecimento prolongado (160°C) e homogeneização, elevando o consumo de energia e potencialmente gerando novos impactos ambientais.

Análise de inventário do ciclo de vida

A etapa de Análise de Inventário do Ciclo de Vida envolveu a coleta e quantificação de todos os dados de entrada (recursos naturais, energia, materiais) e saída (emissões para o ar, água e solo, resíduos) associados à produção de 1 kg de cada tipo de ligante asfáltico (P0, P10 e P20). Os dados foram obtidos a partir dos seguintes bancos de dados secundários:

- *Ecoinvent 3.5* (processos de energia, transporte e materiais);
- *USDA LCA Digital Commons* (dados agrícolas e industriais);
- *OzLCI*;
- *LCIA Methods* (métodos de avaliação de impacto).

O software utilizado foi o *OpenLCA* (versão 2.3.1), selecionado por ser de código aberto, robusto e compatível com os bancos de dados citados.

Avaliação de impactos ambientais

Nesta fase, os dados de inventário foram traduzidos em impactos ambientais

potenciais. O software utilizado para a modelagem e avaliação (*OpenLCA*), permite a integração de diversos bancos de dados. O *OpenLCA* foi utilizado para processar os inventários e calcular os resultados das categorias de impacto. As categorias de impacto ambiental analisadas foram:

- Aquecimento Global (kg CO₂ eq)
- Ecotoxicidade Aquática (kg 1,4-DCB eq)
- Eutrofização (kg P eq)
- Toxicidade Humana (kg 1,4-DCB eq)
- Ecotoxicidade Marinha (kg 1,4-DCB eq)
- Depleção da Camada de Ozônio (kg CFC-11 eq)
- Oxidação Fotoquímica (kg NMVOC)
- Acidificação (kg SO₂ eq)
- Eutrofização marinha (kg N eq)
- Formação de Material Particulado (kg PM₁₀ eq)
- Esgotamento fóssil (kg oil eq)
- Ecotoxicidade Terrestre (kg 1,4-DCB eq)

Foram consideradas abordagens pelo método: ReCiPe 2014 (*Midpoint*). A escolha do *Midpoint* justifica-se por permitir uma análise intermediária, vinculando diretamente os fluxos de inventário (emissões, consumo de recursos) a categorias específicas de impacto, o que facilita comparações técnicas e a identificação de *trade-offs* (Hujibregts *et al.*, 2017). O transporte marítimo inicial foi considerado devido à origem importada de

parte das matérias-primas, enquanto o transporte rodoviário de distribuição reflete a realidade logística.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio da busca na literatura científica sobre a viabilidade técnica do asfalto-borracha, foram escolhidos dois artigos nos quais os autores apresentaram resultados de ensaios laboratoriais de ligantes modificados por borracha de pneus:

- Alsheyab, Mohammad A. T.; Khedaywi, Taisir; Ogiliat, Omar (2023) – Effect of Waste Tire Rubber on Properties of Asphalt Cement and Asphalt Concrete Mixtures: State of the Art; Publicado no periódico *International Journal of Pavement Research and Technology*
- Pinheiro, Jorge Henrique Magalhães (2004) – Incorporação de Borracha de Pneus em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco). Dissertação de Mestrado.

A Tabela 2 resume os resultados médios encontrados na literatura para cada formulação, apresentando uma análise comparativa das propriedades de ligantes asfálticos P10 e P20 comparando-as com os limites estabelecidos pelas normas DNIT 111/2009-EM.

Tabela 2: Resultados laboratoriais de ligantes asfálticos com adição de borracha.

(continua)

Propriedade	CAP + 10% Borracha	CAP + 20% Borracha	Limites por norma DNIT 111/2009-EM		Fonte
			Tipo AB 8	Tipo AB 22	
Penetração (25°C)	62 dmm	59 dmm	30-70 dmm	50-70 dmm	Alsheyabet <i>al.</i> (2023) - Dados experimentais
	45 dmm	55 dmm			Pinheiro (2004) - Dados experimentais

(conclusão)

Propriedade	CAP + 10% Borracha	CAP + 20% Borracha	Limites por norma DNIT 111/2009-EM		Fonte
			Tipo AB 8	Tipo AB 22	
Ponto de Amolecimento (R&B)	59,7°C	66,9°C	55°C	57°C	Pinheiro (2004) - Dados experimentais
Viscosidade (175°C)	650 - 693,3 cP	2013 - 2507 cP	800-2000 cP	2200-4000 cP	Pinheiro (2004) - Dados experimentais
Ductilidade	88 cm	75 cm	50 cm	55 cm	Alsheyabet <i>al.</i> (2023) - Dados experimentais
Envelhecimento (<i>Rolling Thin-Film Oven Test</i> (RTFOT))	Perda de massa: 0,028%	Perda de massa: 0,176%	≤1%	≤1%	Pinheiro (2004) - Dados experimentais

Fonte: Elaborado pela própria autora.

A análise dos ligantes asfálticos com 10% e 20% de borracha, conforme a Tabela 1, mostra um bom desempenho geral frente à norma DNIT 111/2009-EM.

Ambos os ligantes atendem e até superam as especificações para penetração, ponto de amolecimento, ductilidade e envelhecimento (RTFOT). Os resultados indicam que a adição de borracha melhora a resistência a altas temperaturas e a durabilidade, sem comprometer a flexibilidade.

O ponto de atenção está na viscosidade a 175°C. O ligante com 10% de borracha (650-693,3 cP) não atinge o mínimo normativo para o Tipo AB 8 (800 cP). Já o ligante com 20% (2013-2507 cP) atende à faixa do Tipo AB 8, como também alcança o mínimo exigido para o Tipo AB 22 (2200 cP).

Em resumo, os ligantes modificados demonstram um bom potencial, mas a formulação com 20% de borracha se mostra mais próxima de atender aos requisitos mais rigorosos de desempenho (Tipo AB 22).

Validação do Modelo de Inventário do CAP Puro

A validação do modelo de inventário (ICV) é uma etapa para assegurar a confiabilidade dos resultados. Para este fim, o modelo desenvolvido para o CAP puro foi comparado com o estudo de De Pascale *et al.* (2023). A escolha desta referência foi estratégica, uma vez que ambos os estudos compartilham o mesmo escopo de análise (*cradle-to-gate*) e método de avaliação (ReCiPe), minimizando as incertezas metodológicas na comparação.

Contudo, uma diferença crucial nas fronteiras do sistema deve ser abordada. O presente estudo modelou o ligante asfáltico (CAP) isoladamente, enquanto De Pascale *et al.* (2023) analisaram a mistura asfáltica completa, que inclui agregados e fibras, e na qual o ligante representa apenas 5,4% da massa total. A comparação direta dos resultados totais seria, portanto, metodologicamente incorreta.

Para superar essa limitação, foi necessário realizar uma normalização dos

resultados do estudo de referência. A literatura de ACV de pavimentos estabelece um consenso claro de que o ligante asfáltico é o principal contribuinte para os impactos ambientais da mistura (Santero *et al.*, 2011). Segundo Global Highways (Smith, 2024), com base em um estudo referenciado de Aguiar-Moya *et al.* (2015), o ligante representaria 94% das emissões de CO₂, enquanto os agregados contribuiriam com apenas 6%, apesar de representarem 95% da massa da mistura. Para aprofundar essa análise, o relatório do Asphalt Institute (2019) retrata que a extração do petróleo bruto é responsável por aproximadamente 65% a 70% do impacto total de aquecimento global e da demanda de energia. Isso prova que a maior parte da “culpa” ambiental do ligante asfáltico vem de sua matéria-prima, muito antes de ele ser produzido.

Já em Araujo *et al.* (2022) identificaram que a produção do ligante foi responsável por 80 a 90% do impacto total em categorias como ecotoxicidade e toxicidade humana. De forma semelhante, Bressi *et al.* (2019) verificaram que, em análises de misturas com borracha moída e RAP, a produção do ligante respondeu por 69,3% e 73,2% da ecotoxicidade marinha.

Com base neste consenso, os resultados de De Pascale *et al.* (2023) foram ajustados, considerando-se que o ligante seria responsável por uma faixa de 70% dos impactos totais da mistura, para se obter um alvo de calibração para o modelo de CAP puro.

A Tabela 3 apresenta os resultados para o ligante convencional (P0) e para os ligantes adicionados com 10% e 20% (P10 e P20) de borracha, detalhando o desempenho ambiental de cada cenário nas diferentes categorias de impacto avaliadas.

Tabela 3: Quantificação dos Impactos Ambientais do CAP com borracha e CAP puro.

Cat. de Impacto	Unidade	CAP puro (dados ajustados de De Pascale <i>et al.</i> (2023))	P0	P10	P20
Aquecimento Global	kg CO2 eq	1,2E-00	9,556E-01	8,680E-01(-)	7,522E-01(-)
Ecotox. Aquática	kg 1,4-DB eq	3,15E-02	5,535E-02	4,985E-02(-)	6,657E-02(+)
Eutrofização	kg P eq	2,070E-04	2,000E-04	5,940E-05(-)	4,693E-05(-)
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	1,24E+00	1,224E+00	1,178E+00(-)	6,919E-01(-)
Ecotox. Marinha	kg 1,4-DB eq	4,54E-02	5,384E-02	5,181E-02(-)	7,191E-02(+)
DCO	kg CFC-11 eq	4,21E-08	2,500E-08	2,250E-08(-)	1,778E-08(-)
Oxid. Fotoquímica	kg NMVOC	5,40E-03	8,484E-03	7,627E-03(-)	6,027E-03(-)
Acidificação	kg SO2 eq	8,30E-03	8,082E-03	7,274E-03(-)	5,754E-03(-)
Eutro. Marinha	kg N eq	2,67E-04	2,064E-04	1,854E-04(-)	1,465E-04(-)
Form. de PM10	kg PM10 eq	2,90E-03	2,238E-03	2,213E-03(-)	1,992E-03(-)
Esgotamento Fóssil	kg oil eq	1,09E+00	1,061E+00	9,548E-01(-)	7,544E-01(-)
Ecotox. Terrestre	kg 1,4-DB eq	5,28E-00	4,015E-03	4,147E-03(+)	3,075E-03(-)

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Os resultados obtidos para o ligante asfáltico convencional (P0) mostraram-se coerentes com os valores reportados por De

Pascale *et al.* (2023). Com base no estudo de referência, e após a normalização dos resultados para o teor médio de ligante de 5,4

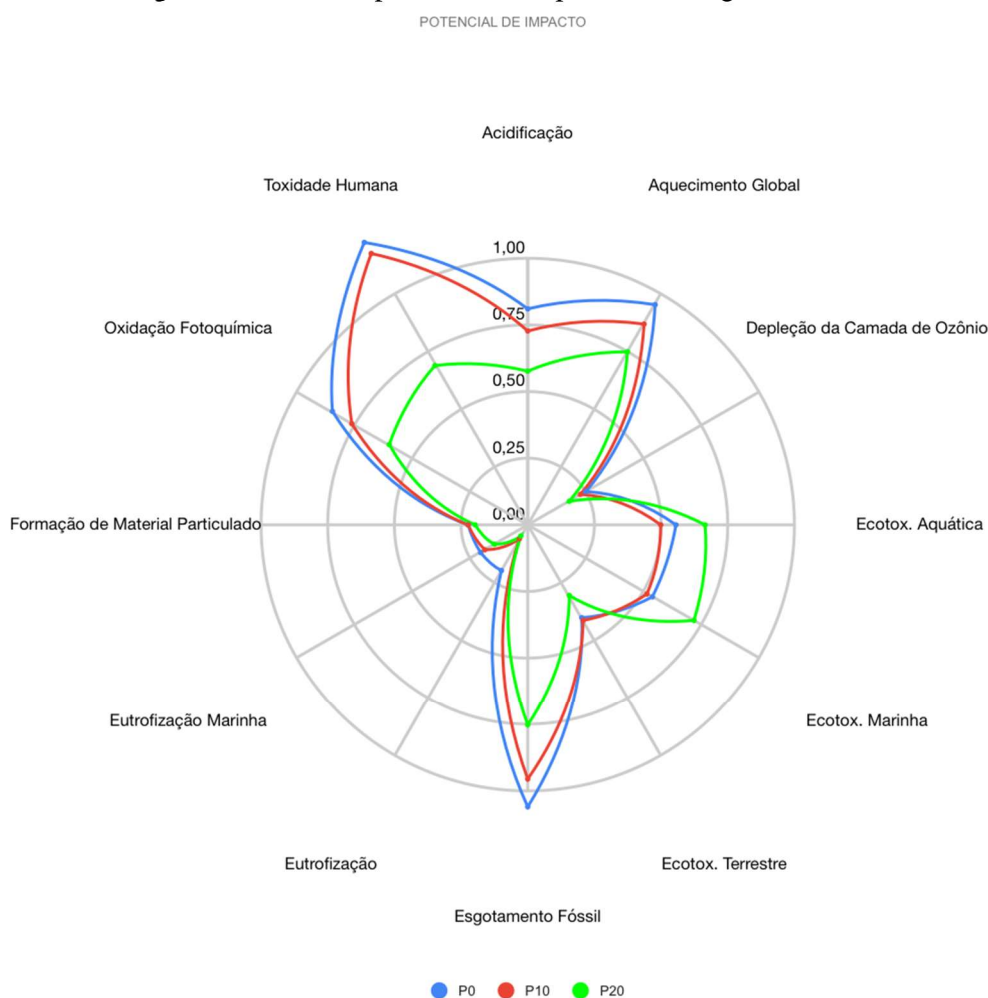
% da mistura asfáltica, os valores obtidos neste trabalho se mantiveram plenamente dentro do intervalo esperado (considerando que o ligante asfáltico é responsável por aproximadamente 60 % a 80 % dos impactos ambientais totais da mistura). Essa correspondência evidencia uma boa calibração do inventário e confirma a coerência metodológica entre o presente estudo e a literatura.

Além da comparação com o estudo de De Pascale *et al.* (2023), verificou-se que, para a categoria Ecotoxicidade Terrestre, os resultados obtidos neste trabalho apresentaram valores superiores. Para validar essa diferença, realizou-se uma verificação na literatura recente, identificando que o estudo de Vieira e

Kunert (2023) obteve resultado semelhante ($5,907E-03$ kg 1,4-DCB eq). Essa variação pode ser atribuída a diferenças nas bases de dados de inventário e nos métodos de caracterização utilizados em cada ACV, o que é comum em análises de ciclo de vida (Finnveden *et al.*, 2009).

A Figura 5 apresenta as doze categorias de impacto analisadas. Para facilitar a interpretação dos resultados, os impactos foram representados em uma escala de 0 a 1,2. Nessa escala, o valor 0 indica o menor impacto possível, enquanto o valor 1,2 representa o impacto máximo observado na avaliação.

Figura 5: Gráfico de potencial de impacto das categorias analisadas.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Em geral, os valores refletem a carga ambiental por unidade funcional, em unidades específicas de cada categoria. A análise dos resultados revela tendência de redução de

impactos à medida que aumenta o teor de borracha, conforme observado na literatura: asfaltos com borracha reciclada costumam exigir menos CAP virgem e evitam o envio de

pneus a aterros (Bartolozzi *et al.*, 2013;). O que leva a quedas nos principais indicadores ambientais.

O Potencial de Aquecimento Global (GWP – CO₂ eq) apresentou uma redução progressiva, passando de 0,955 kg CO₂ eq no CAP Puro para 0,752 kg CO₂ eq no cenário com 20% de borracha. Essa melhoria se explica por dois fatores principais: primeiro, a adição de borracha diminui a demanda por CAP virgem, cuja produção a partir do refino de petróleo é altamente intensiva em energia e, consequentemente, em emissões de gases de efeito estufa. Segundo o uso de pneus reciclados representa uma rota de valorização que evita as emissões associadas ao seu descarte tradicional, como a queima ou a decomposição em aterros (Lo Presti, 2013; Bartolozzi *et al.*, 2013), gerando um “crédito ambiental” para o sistema.

De forma ainda mais expressiva, o impacto no Esgotamento de Recursos Fósseis (kg oil eq) demonstrou uma queda acentuada, passando de 1,061 kg oil eq no CAP Puro para 0,754 kg oil eq no CAP+20%. Este resultado é uma consequência direta da substituição de um material derivado do petróleo (CAP) por um material reciclado (borracha), alinhando-se ao consenso da literatura de que o ligante virgem é o principal consumidor de energia primária fóssil na produção de misturas asfálticas (Aurangzeb *et al.*, 2014; Gschösser *et al.*, 2013).

Reduções consistentes também foram observadas nas categorias de Acidificação e Oxidação Fotoquímica. Como a produção do CAP envolve processos de refino com emissões significativas de dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x) (Santero *et al.*, 2011), a diminuição do volume de ligante virgem na mistura contribui diretamente para mitigar esses impactos. Similarmente, os impactos de Eutrofização Terrestre e Marinha caíram drasticamente, pois a menor dependência do ciclo do petróleo, especialmente do refino para produção de ligante asfáltico, está associada à diminuição das emissões derivadas desse processo. No inventário do Asphalt Institute (2019), o

processo de produção do ligante apresenta emissões de óxidos de nitrogênio para o ar e de nitrato e fósforo para a água (Asphalt Institute, 2019). Adicionalmente, a etapa de transporte do insumo desde os locais de extração até as refinarias, majoritariamente realizada por via marítima, também é uma fonte significativa de poluentes como os óxidos de nitrogênio (NO_x), contribuindo de forma relevante para esses mesmos impactos ambientais (IMO, 2023; EPA, 2024).

Sobre a ecotoxicidade aquática e marinha, apesar da redução inicial em 10% de borracha, com 20% os impactos aumentaram. Isso pode estar associado à liberação de compostos químicos durante o processamento da borracha, como aditivos presentes nos pneus (óleos aromáticos e metais pesados) (Hashamfirooz *et al.*, 2023), que podem contribuir para toxicidade aquática quando modelados em bancos de dados de ACV.

A ecotoxicidade terrestre mostra um leve aumento com 10% de borracha em comparação com o CAP puro, e uma redução com 20%. Este comportamento não linear indica um *trade-off* complexo. O aumento inicial pode estar ligado a emissões ou resíduos específicos do processo de modificação com borracha que afetam o ambiente terrestre, como zinco presente nos pneus. No entanto, o benefício da maior substituição de CAP virgem com 20% de borracha parece compensar esses impactos, resultando em uma redução geral.

A respeito da Toxicidade Humana, observou-se uma redução significativa no P20 (0,692 kg 1,4-DB eq, contra 1,224 kg no P0). Isso reflete a menor dependência do refino de petróleo, atividade intensiva em emissão de compostos cancerígenos (HPA e metais). Contudo, no P10, a redução foi modesta, sugerindo que os impactos da etapa de trituração e incorporação da borracha compensaram parte da redução esperada.

Com relação a Depleção da Camada de Ozônio (DCO) verificou-se uma pequena queda. Como a borracha substitui parte do CAP virgem, há menos emissões associadas a

processos petroquímicos que liberam substâncias com potencial de destruição de ozônio estratosférico, embora a contribuição absoluta seja baixa em todos os cenários, comparando ao estudo de De Pascale *et al.*, 2023. No entanto, estudos de ACV demonstram que o processo de trituração, em particular, pode ser intensivo em energia e contribuir para diferentes categorias de impacto ambiental, compensando parcialmente os ganhos obtidos pela reciclagem (Farina *et al.*, 2017). Dessa forma, a semelhança nos resultados de DCO entre o asfalto convencional e o modificado sugere que, enquanto as emissões da produção de CAP são reduzidas, as emissões provenientes do processamento da borracha assumem uma relevância que equilibra o resultado final.

A formação de material particulado (PM10) também diminui. Partículas finas são prejudiciais à saúde humana e podem ser emitidas durante processos de combustão e industriais. A redução indica um benefício na qualidade do ar com a utilização do asfalto-borracha.

CONCLUSÃO

A motivação central deste trabalho partiu de um questionamento fundamental: embora a ideia de reciclar pneus para uso em pavimentação seja intuitivamente positiva, seria essa prática realmente benéfica ao meio ambiente quando todo o seu ciclo de processamento é considerado? Para responder a essa pergunta, este estudo se propôs a realizar uma análise de viabilidade ambiental, utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para comparar o ligante asfáltico convencional (CAP puro) com misturas contendo 10% e 20% de borracha de pneu reciclada.

Os resultados obtidos confirmam que, mesmo contabilizando as etapas de coleta, transporte e trituração da borracha, a incorporação deste material no asfalto representa uma estratégia ambientalmente vantajosa. A principal descoberta foi a quantificação dessa melhoria: a substituição do

CAP virgem levou a uma redução significativa dos impactos em categorias críticas. No cenário com 20% de borracha, o Potencial de Aquecimento Global reduziu em 21,2%, e uma queda expressiva também foi notada no Esgotamento de Recursos Fósseis, com redução de 28,9%. Fica claro, portanto, que a menor dependência do refino de petróleo, um processo de alta intensidade energética, é o fator chave que confere ao asfalto-borracha seu desempenho ambiental superior.

Ao longo da análise, foi possível observar a complexidade do balanço ambiental. Indicadores como a Ecotoxicidade Aquática, por exemplo, revelaram a existência de *trade-offs*, onde o processo de modificação da borracha pode introduzir impactos específicos que não devem ser ignorados. Ainda assim, o balanço geral se mostrou favorável. Os benefícios decorrentes da maior substituição de CAP virgem no cenário de 20% foram suficientes para compensar esses efeitos adversos, resultando em um saldo ambiental positivo na maioria das categorias analisadas.

Conclui-se, portanto, que a tecnologia do asfalto-borracha vai além de ser apenas uma solução para o descarte de pneus. Ela se firma como uma alternativa ecologicamente mais eficiente que o método convencional, validando a premissa inicial deste estudo. Ao transformar um resíduo em matéria-prima, esta abordagem promove um exemplo prático de economia circular na engenharia rodoviária, contribuindo simultaneamente para a redução do consumo de recursos não renováveis e para a mitigação da pressão sobre os aterros sanitários.

Como limitações do presente estudo, destaca-se que a Avaliação do Ciclo de Vida foi conduzida com base em dados secundários provenientes da literatura e de bases de dados, não contemplando a realização de ensaios experimentais próprios. Além disso, o escopo adotado restringiu-se à abordagem *cradle to gate*, não sendo avaliadas as fases de uso, manutenção e fim de vida do pavimento. Ressalta-se também que a análise da viabilidade técnica se baseou em um número limitado de estudos, selecionados em função

da compatibilidade dos teores de borracha analisados e do atendimento às exigências normativas, bem como que foram considerados apenas os percentuais de 10% e 20% de borracha.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação do escopo da Avaliação do Ciclo de Vida para a abordagem *cradle to grave*, de modo a contemplar todas as etapas do ciclo de vida do pavimento. Adicionalmente, sugere-se a investigação de técnicas de pré-tratamento da borracha de pneus, visando à mitigação da liberação de compostos potencialmente tóxicos aos ecossistemas aquáticos e terrestres, como o zinco, contribuindo para a melhoria do desempenho ambiental global dos asfaltos modificados.

REFERÊNCIAS

- AKODEDJRO, Enock. **O asfalto borracha no Benim**: estudo bibliográfico, de viabilidade e desempenho estrutural. 2024. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2024. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br/handle/prefix/6995>. Acesso em: 05 set. 2025.
- ALSHEYAB, M. A. T.; KHEDAYWI, T.; OGILIAT, O. Effect of waste tire rubber on properties of asphalt cement and asphalt concrete mixtures: state of the art. **International Journal of Pavement Research and Technology**, [S. l.], v. 18, p. 516-527, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42947-023-00361-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42947-023-00361-4>. Acesso em: 7 set. 2025.
- AURANGZEB, Q.; AL-QADI, I. L.; OZER, H.; YANG, R. Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. **Resources, Conservation and Recycling**, [S. l.], v. 83, p. 77-86, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.004>.
4. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092134491300270X?via%3Dihub>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- MAUPIN, G. W., Jr.; MOULTHROP, J. S. **Life cycle assessment of asphalt binder**. College Park, MD: Asphalt Institute, 2019. (Relatório MS-27). Disponível em: <https://www.asphaltinstitute.org/engineering/engineering-publications/ms-27-life-cycle-assessment-of-asphalt-binder/>. Acesso em: 22 out. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.
- BARTOLOZZI, I.; ANTUNES, I.; RIZZI, F. The environmental impact assessment of Asphalt Rubber: Life Cycle Assessment. In: ASPHALT RUBBER “ROADS OF THE FUTURE” INTERNATIONAL CONFERENCE, 2012, Munique. **Anais [...]**. Munique: Rubber Asphalt Foundation, 2012. Disponível em: https://www.ra-foundation.org/wp-content/uploads/2013/02/049-PAP_065.pdf. Acesso em: 01 set. 2025.
- BRESSI, S.; SANTOS, J.; MILOSEVIC, M.; LEROSA, A. C.; CARTER, A. A comparative environmental impact analysis of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaimed asphalt pavement using life cycle assessment. **International Journal of Pavement Engineering**, [S. l.], v. 22, n. 4, p. 524-538, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1623404>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2019.1623404>. Acesso em: 18 nov. 2025.
- CAVALETT, O.; CHAGAS, M. F.; SEABRA, J. E. A.; BONOMI, A. Comparative LCA of

ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [S. l.], v. 18, p. 647-658, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0465-0>.

Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-012-0465-0>. Acesso em: 11 out. 2025.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso futuro comum**. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1991. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4245128/mod_resource/content/1/Nosso%20Futuro%20Comum.pdf. Acesso em: 05 jul. 2025.

CURRAN, M. A. **Life Cycle Assessment Student Handbook**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

DE PASCALE, B.; TATARANNI, P.; BONOLI, A.; LANTIERI, C. Comparative life cycle assessment (LCA) of porous asphalt mixtures with sustainable and recycled materials: a cradle-to-gate approach. **Materials**, [S. l.], v. 16, n. 19, p. 6540, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16196540>. Disponível em: [Comparative Life Cycle Assessment \(LCA\) of Porous Asphalt Mixtures with Sustainable and Recycled Materials: A Cradle-to-Gate Approach](https://doi.org/10.3390/ma16196540). Acesso em: 01 out. 2025.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **NORMA DNIT 111/2009-EM: Pavimentação flexível — Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” — Especificação de material**. Rio de Janeiro: IPR, 2009. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/normas/especificacao-de-material-em/dnit_111_2009_em-1.pdf. Acesso em: 11 abr. 2026.

4 MOTIVOS que fazem o asfalto-borracha contribuir para a segurança viária. **Ecovias**, [S. l.], 27 out. 2020. Disponível em: [https://www.ecoviaslestepaulista.com.br/notic](https://www.ecoviaslestepaulista.com.br/noticias/releases-institucionais/4-motivos-que-fazem-o-asfalto-borracha-contribuir-para-a-seguranca-viaria-204918)

[ias/releases-institucionais/4-motivos-que-fazem-o-asfalto-borracha-contribuir-para-a-seguranca-viaria-204918](https://www.ecoviaslestepaulista.com.br/noticias/releases-institucionais/4-motivos-que-fazem-o-asfalto-borracha-contribuir-para-a-seguranca-viaria-204918). Acesso em: 23 ago. 2025.

ELKINGTON, J. **Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business**. Oxford: Capstone, 1997.

FARINA, A. *et al.* Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PAVEMENT LCA, 2014, Davis, CA. **Proceedings** [...]. Davis: University of California Pavement Research Center, 2014. Disponível em: https://ucprc.ucdavis.edu/p-lca2014/media/pdf/Papers/LCA14_Crumb%20Rubber%20Pavements.pdf. Acesso em: 03 ago. 2025.

FERREIRA, M. S. da S. **Pavimentação sustentável: os benefícios da implantação do asfalto-borracha em centros urbanos**. 2019. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade Pitágoras de Belo Horizonte, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/40576/1/Maria+Sheila+da+Silva+Ferreira.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2025.

FINNVEDEN, G. *et al.* Recent developments in life cycle assessment. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 91, n. 1, p. 1-21, out. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479709002345?via%3Dihub>. Acesso em: 5 nov. 2025.

FORMAN, R. T. T. *et al.* **Road Ecology: science and solutions**. Washington, D.C.: Island Press, 2003.

GSCHÖSSER, F. **Life cycle assessment of representative swiss road pavements for national roads with an accompanying life cycle cost analysis**. Zurich: ETH Zurich, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/es400309e>. Disponível em:

<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es400309e>. Acesso em: 18 out. 2025.

GUINÉE, J. B. *et al.* Life cycle assessment: past, present, and future. **Environmental Science & Technology**, [S. l.], v. 45, n. 1, p. 90-96, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/es101316v>.

Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es101316v>. Acesso em: 02 out. 2025.

HASHAMFIROOZ, M. *et al.* A systematic review of the environmental and health effects of waste tires recycling. **Heliyon**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 1-18, fev. 2025. Disponível em: <https://www.cell.com/action/showPdf?pii=S2405-8440%2825%2900289-0>. Acesso em: 11 nov. 2025.

HUIJBREGTS, M. A. J. *et al.* ReCiPe2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [S. l.], v. 22, p. 138-147, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-016-1246-y>. Acesso em: 02 out. 2025.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13**: control for marine diesel engines. Londres: IMO, 2023. Disponível em: [https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/nitrogen-oxides-\(nox\)-%E2%80%93-regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/nitrogen-oxides-(nox)-%E2%80%93-regulation-13.aspx). Acesso em: 19 nov. 2025.

KRAU, M. S. *et al.* Avaliação do ciclo de vida na pavimentação asfáltica: uma revisão sistemática. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 35., 2021, [S. l.]. **Anais [...]**. Manaus: ANPET, 2021. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais35/documentos/2021/Infraestrutura/Avalia%C3%A7%C3%A3o%20e%20Gest%C3%A3o%20de%20Pavimentos/2_52_AC.pdf. Acesso em: 12 out. 2025.

LIMA, M. S. S.; MAKOUNDOU, C.; SANGIORGI, C.; GSCHÖSSER, F. Life cycle assessment of innovative asphalt mixtures

made with crumb rubber for impact-absorbing pavements. **Sustainability**, [S. l.], v. 14, n. 22, p. 14798, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142214798>.

Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/22/14798>. Acesso em: 03 out. 2025.

LO PRESTI, D. Recycled materials in road construction: a life cycle assessment approach. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 44, p. 20-29, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813008477?via%3Dihub>.

Acesso em: 03 out. 2025.

MAIA, I. G. *et al.* Comportamento reológico de ligantes asfálticos modificados com asfaltos-borracha de quarta geração (pellets). **Transportes**, [S. l.], v. 30, n. 1, p. 2692, 2022. Disponível em: <https://transportes.anpet.org.br/anpet/article/view/2692/1007>. Acesso em: 20 ago. 2025.

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. **Cradle to cradle: remaking the way we make things**. New York: North Point Press, 2002.

MENDES, G. C. R. **Viabilidade do asfalto borracha na pavimentação urbana**: estudo de caso no residencial Jardim do Cerrado III, Goiânia, Goiás. 2019. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2019. Disponível em: <https://tede2.pucgoias.edu.br/handle/tede/4173>. Acesso em: 05 nov. 2025.

PIAO, Z.; BUENO, M.; POULIKAKOS, L. D.; HELLWEG, S. Life cycle assessment of rubberized semi-dense asphalt pavements: a hybrid comparative approach. **Resources, Conservation & Recycling**, [S. l.], v. 176, 105950, jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105950>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921005590?via%3Dihub>. Acesso em: 14 nov. 2025.

PINHEIRO, J. H. M. **Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (processos úmido e seco)**. 2004. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/4898>. Acesso em: 15 ago. 2025.

PRAZERES, F. F.; Ó, F. R.; LOPES, V. F. A utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos de tráfego leve. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 14., 2024, São Luís. **Anais** [...]. São Luís: EDUFOR, 2024. p. 1-23. Disponível em: <https://saoluis.edufor.edu.br/uploads/repositorios/files/2024/10/a-utilizacao-de-residuos-de-borracha-de-pneus-em-pavimentos-asfalticos-de-traffic-leve-25.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2025.

REBITZER, G. *et al.* Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, [S. l.], v. 30, n. 5, p. 701-720, jul. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0160412003002459?via%3Dihub>. Acesso em: 20 jul. 2025.

ROCKSTRÖM, J. *et al.* A safe operating space for humanity. **Nature**, [S. l.], v. 461, n. 7263, p. 472-475, set. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1038/461472a>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/461472a>. Acesso em: 22 jun. 2025.

ROSA, A. Z. *et al.* Avaliação do desempenho de ligantes asfálticos modificados com borracha e polímero SBS: propriedades reológicas e deformação permanente da mistura. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 25., 2023, Foz do Iguaçu. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu: ENACOR, 2023. p. 624-635. Disponível em: <https://enacorrapv.com.br/anais/2023/TT369.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2025.

SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2002.

SANTERO, N. J.; MASANET, E.; HORVATH, A. Life-cycle assessment of pavements: a critical review of existing literature and research. **Resources, Conservation & Recycling**, [S. l.], v. 55, n. 9-10, p. 801-809, jul. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344911000474?via%3Dihub>. Acesso em: 20 jun. 2025.

SIVERIO LIMA, M. S. *et al.* Life cycle assessment of innovative asphalt mixtures made with crumb rubber for impact-absorbing pavements. **Sustainability**, [S. l.], v. 14, n. 22, 14798, nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142214798>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/22/14798>. Acesso em: 9 nov. 2025.

SMITH, K. **Bitumen trade bodies lead the carbon charge**. Global Highways, [S. l.], 18 out. 2024. Disponível em: <https://www.globalhighways.com/feature/bitumen-trade-bodies-lead-carbon-charge>. Acesso em: 18 nov. 2025.

TOWARDS sustainable pavement systems: a reference document. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2015. (FHWA-HIF-15-002). Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/sustainability/hif15002.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Regulations for Emissions from Marine Compression-Ignition (Diesel) Engines**. Washington, D.C., 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-emissions-marine-compression-ignition-diesel>. Acesso em: 19 nov. 2025.

VEGA-ARAUJO, D. L.; SANTOS, J.; MARTINEZ-ARGUELLES, G. Environmental performance evaluation of

warm mix asphalt with recycled concrete aggregate for road pavements. **International Journal of Pavement Engineering**, [S. l.], v. 24, n. 1, 2064999, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2064999>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2022.2064999>. Acesso em: 2 nov. 2025.

VIEIRA, G. A.; KUNERT, R. F. Avaliação de ciclo de vida ambiental do cimento asfáltico de petróleo puro e com adição de sacolas plásticas. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 25.; REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 48., 2023, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: ABDER, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/375408955>. Acesso em: 5 maio 2025.

AGRADECIMENTOS

O meu primeiro e maior agradecimento é a Deus, por ser minha fortaleza e minha guia, e por colocar pessoas abençoadas no meu caminho para que eu chegasse até aqui.

Meus sinceros agradecimentos aos meus pais, Wagner e Rejane, que são os alicerces da minha vida. Obrigada por todo o sacrifício, pelo amor incondicional e por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais desafiadores. Vocês fizeram de tudo, e muito mais, para que esta conquista fosse possível. Esta realização é tanto minha quanto de vocês.