

Uso de pneus inservíveis na pavimentação asfáltica: aspectos técnicos, ambientais e estudo de caso em Minas Gerais

Use of End-of-Life Tires in Asphalt Pavements: Technical and Environmental Aspects and a Case Study in Minas Gerais, Brazil

Danyelly Vilela Lopes, Graduanda, Universidade Federal de Juiz de Fora

danyelly.lopes@estudante.ufjf.br

Luísa Muglia Souza Porphyrio, MSc, Universidade Federal do Rio de Janeiro

luisa.muglia@pet.coppe.ufrj.br

José Alberto Barroso Castañón, DSc, Universidade Federal de Juiz de Fora

jose.castanon@ufjf.br

Número da sessão temática da submissão – [03-Materiais alternativos e inovações tecnológicas]

Resumo

O presente artigo analisa a aplicação de pneus inservíveis na pavimentação asfáltica por meio do asfalto-borracha, destacando seus aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Com base em revisão bibliográfica e estudo de caso em Minas Gerais, verifica-se que a tecnologia aumenta a flexibilidade, resistência à fadiga e durabilidade do pavimento, reduzindo a necessidade de manutenção e prolongando a vida útil das rodovias. Ambientalmente, a reutilização de aproximadamente 1,6 milhão de pneus contribui para a redução de resíduos sólidos e das emissões associadas à produção de ligantes convencionais, alinhando-se aos princípios da economia circular. Entretanto, alguns processos de produção, como despolimerização e desvulcanização, apresentam impacto ambiental relevante, exigindo atenção na escolha tecnológica. Economicamente, apesar do custo inicial superior, o asfalto-borracha mostra viabilidade a médio e longo prazo. Os resultados indicam que políticas públicas, planejamento técnico e controle de qualidade são essenciais para consolidar essa prática como alternativa sustentável e eficiente no setor rodoviário brasileiro.

Palavras-chave: Pavimentação Sustentável; Pneus Inservíveis; Asfalto-Borracha

Abstract

This article analyzes the use of end-of-life tires in asphalt pavement through rubberized asphalt, emphasizing its technical, economic, and environmental aspects. Based on a literature review and a case study in Minas Gerais, Brazil, the technology is shown to enhance pavement flexibility, fatigue resistance, and durability, reducing maintenance needs and extending the service life of roadways.

Environmentally, the reuse of approximately 1.6 million tires helps decrease solid waste and emissions associated with conventional binder production, aligning with circular economy principles. However, some production processes, such as devulcanization and depolymerization, have notable environmental impacts, requiring careful technological choices. Economically, despite higher initial costs, rubberized asphalt proves to be viable in the medium and long term. The results indicate that public policies, technical planning, and quality control are essential to establish this practice as a sustainable and efficient alternative for the Brazilian road sector.

Keywords: Sustainable pavement; End-of-life tires; Rubberized asphalt

1. Introdução

Com dimensões continentais, o Brasil depende majoritariamente do sistema rodoviário pavimentado para o transporte de cargas e passageiros, o que confere à infraestrutura viária papel estratégico no desenvolvimento econômico e territorial do país (IBGE, 2022). No final da década de 1920, o então presidente Washington Luís popularizou a expressão “Governar é abrir estradas”, defendendo a ideia de que o desenvolvimento nacional dependia da expansão da infraestrutura rodoviária como forma de promover a modernização, a integração territorial e o progresso econômico. À época, o país ainda contava com uma malha ferroviária significativa, que gradualmente perdeu espaço nos investimentos públicos em detrimento da valorização do sistema rodoviário, processo que se intensificou ao longo das décadas seguintes, especialmente durante os governos de Getúlio Vargas e Juscelino Kubitschek (Barat, 1978).

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2023), o Brasil possui atualmente uma malha rodoviária superior a 1,7 milhão de quilômetros. Entretanto, apenas cerca de 12,4% desse total é pavimentado, o que corresponde a aproximadamente 213,5 mil quilômetros de rodovias pavimentadas (CNT, 2023). Esse percentual é considerado reduzido quando comparado à extensão territorial do país, representando cerca de 25 km de rodovias pavimentadas para cada 1.000 km² (CNT, 2023). Esse percentual é considerado reduzido quando comparado à extensão territorial do país, evidenciando a limitação da infraestrutura pavimentada frente às demandas logísticas e de mobilidade nacional.

Ainda segundo a CNT, o modo rodoviário é responsável por aproximadamente 60% do transporte de cargas e 91% do transporte de passageiros no Brasil, o que evidencia sua importância estratégica para a mobilidade nacional e para o desenvolvimento econômico do país (CNT, 2023). Tal cenário reforça a necessidade de manutenção e melhoria das condições das rodovias, de modo a garantir trafegabilidade, segurança e conforto aos usuários.

Entretanto, em razão de orçamentos historicamente insuficientes destinados ao setor de transportes e dos elevados custos associados aos métodos convencionais de restauração, observa-se um acúmulo significativo de rodovias em condições deterioradas (DNIT, 2018). Esse cenário tem estimulado a busca por soluções técnicas alternativas que conciliem desempenho, redução de custos, evidenciando a necessidade de integrar a dimensão ambiental ao planejamento e à execução das obras rodoviárias, de forma a torná-las mais sustentáveis e economicamente viáveis.

A reutilização de materiais na pavimentação surge como uma alternativa eficiente para a redução dos impactos ambientais e dos custos de implantação e manutenção, uma vez que contribui para a diminuição da extração de recursos naturais, reduz o volume de resíduos gerados e prolonga o ciclo de vida útil dos materiais empregados (DNIT, 2018). Técnicas como a reciclagem de pavimentos asfálticos, a estabilização de solos e o reaproveitamento de resíduos industriais e urbanos permitem não apenas minimizar a degradação ambiental, mas também otimizar os custos e melhorar o desempenho estrutural das vias (Bernucci et al., 2010).

Apesar do avanço das pesquisas sobre o uso de materiais alternativos na pavimentação asfáltica, ainda há lacunas quanto à avaliação integrada de seus efeitos técnicos e ambientais em condições reais de aplicação, especialmente no contexto brasileiro. Grande parte dos estudos concentra-se em análises laboratoriais ou em abordagens isoladas, havendo menor número de investigações que articulem desempenho técnico, benefícios ambientais e evidências empíricas a partir de estudos de caso regionais. Nesse sentido, o presente trabalho contribui ao analisar um estudo de caso real no estado de Minas Gerais, com base em dados provenientes de relatórios técnicos e aplicações práticas, permitindo uma avaliação mais integrada entre desempenho, viabilidade e impactos ambientais.

Dessa forma, ao incorporar práticas de reutilização de materiais no processo construtivo, o setor rodoviário colabora diretamente para a conservação dos recursos naturais, para a redução das emissões associadas à produção de novos insumos e para a construção de rodovias mais duráveis e sustentáveis. Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo analisar o uso de materiais alternativos na pavimentação asfáltica, com ênfase nos aspectos técnicos e ambientais. Sob essa perspectiva, o estado de Minas Gerais apresenta-se como um recorte relevante, em função de sua extensa malha rodoviária, diversidade climática e elevado volume de tráfego. Como contribuição, o trabalho busca integrar evidências técnicas e ambientais, fornecendo uma base para a avaliação da viabilidade dessa solução em projetos de pavimentação rodoviária.

2. Referencial Teórico

2.1 Pneus inservíveis: definição, geração e impactos ambientais

Para garantir desempenho, estabilidade e performance de veículos, o pneu é um produto desenvolvido para trazer segurança aos usuários. Sua fabricação atende a hábitos de consumo que variam entre países segundo condições climáticas e características do sistema viário. O peso de um pneu de automóvel pode variar entre 5,5 e 7 kg, enquanto um pneu de caminhão pesa entre 55 e 80kg. No entanto, sua estrutura apresenta materiais não biodegradáveis que podem levar cerca de 600 anos até a completa decomposição. (Andrietta, 2002).

A produção anual de pneus no Brasil atinge aproximadamente 40 a 50 milhões de unidades, enquanto o número de descartes alcança cerca de 100 milhões, segundo levantamento de avanços e aplicações de reciclagem de pneus inservíveis promovido pela Embrapa (Embrapa,

2025). Já em escala global, são produzidos cerca de 4 bilhões de pneus a cada ano, dos quais aproximadamente 1 bilhão retorna ao meio ambiente como resíduo, evidenciando o crescente desafio de manejo desses materiais (Embrapa, 2025). Esses dados elucidam uma desproporção entre a produção e o descarte, tal excedente pode ser explicado, em parte, pelo acúmulo histórico de pneus descartados, pela maior durabilidade dos materiais ao longo dos anos e pela possível entrada de pneus importados, o que amplia o passivo ambiental associado a esse resíduo, reforçando a necessidade de estratégias eficientes para destinação e reaproveitamento dos pneus inservíveis.

Entende-se por pneus inservíveis, aqueles que já foram utilizados e apresentam estruturas com danos que não são possíveis de serem reparados, não se prestando mais à rodagem ou a reforma. Esses pneus devem receber destinação ambientalmente adequada, conforme estabelece a Resolução CONAMA nº 416/09 (CONAMA, 2009). Para isso, devem ser adotados procedimentos técnicos que promovam a descaracterização de sua forma original, com o reaproveitamento, a reciclagem ou o processamento de seus elementos constituintes por técnicas admitidas pelos órgãos ambientais competentes, em conformidade com a legislação vigente e normas operacionais específicas, de modo a evitar riscos à saúde pública e à segurança, bem como minimizar impactos ambientais adversos (Parra et al., 2010).

O descarte incorreto de pneus gera graves problemas ambientais, como contaminação do solo e da água por substâncias tóxicas, entupimento de bueiros e ocorrência de inundações, além de poluição do ar por queima irregular desses resíduos. Ademais, configura-se um problema de saúde pública, ao criar focos para o mosquito *Aedes aegypti*, transmissor de dengue, zika e chikungunya, e atrair vetores de outras doenças, como ratos e baratas, o que reforça a importância de ações de reciclagem e fiscalização para mitigar os riscos.

2.2 Sustentabilidade e reutilização de materiais na pavimentação

Em um estudo de Thilakshan e Bandara (2019), discute-se a sustentabilidade no setor de transportes como elemento capaz de contribuir para diversas metas globais, incluindo os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável definidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015. Destaca-se, em especial, o ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), uma vez que a incorporação de resíduos na mistura asfáltica promove a reutilização de materiais e reduz a destinação inadequada de pneus no meio ambiente. Além disso, a aplicação do asfalto-borracha contribui para o ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), ao incentivar o uso de tecnologias mais duráveis e eficientes, e para o ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis), ao melhorar a qualidade da infraestrutura viária e reduzir impactos ambientais associados à manutenção frequente das vias.

Uma pavimentação sustentável baseia-se na incorporação de resíduos recicláveis às misturas asfálticas. Essa abordagem surge como uma alternativa eficaz para prolongar a vida útil das

vias, reduzir custos de manutenção e fortalecer a resiliência da infraestrutura rodoviária frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Atualmente, o cenário brasileiro apresenta limitações orçamentárias e uma extensa demanda por manutenção viária. Neste caso, soluções sustentáveis tornam-se estratégicas. O uso de pneus inservíveis insere-se nos princípios da economia circular ao promover a reinserção desses materiais no ciclo produtivo. Além de reduzir a disposição inadequada de resíduos, essa prática contribui para a diminuição da extração de insumos naturais e para o desenvolvimento de pavimentos com desempenho técnico e ambiental aprimorados.

2.3 Uso de pneus inservíveis na pavimentação asfáltica

No Brasil, os estudos para a inserção de borracha em ligantes asfálticos surgiram no início da década de 1990; no entanto, apenas em 1999, ocorreu a aprovação e o incentivo do uso desse material em obras rodoviárias. Essa utilização foi definida pela Resolução nº 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (1999), que estabelece diretrizes para a destinação de pneus inservíveis, conforme discutido por Souza e Mota (2019).

O Pavimento Modificado com Borracha de Pneus é uma mistura efetuada a quente, sob condições controladas, de ligante asfáltico (cimento asfáltico de petróleo – CAP) e borracha moída de pneus (BMP), na qual o teor da borracha varia de 15% a 20% em relação ao peso total da mistura, podendo incluir diluentes e alguns aditivos especiais, se houver necessidade (Petrobras, 2003).

De acordo com Mendes (2019) e Vucovic (2021), o processo de utilização de pneus inservíveis na pavimentação asfáltica envolve algumas etapas principais, descritas a seguir:

- **Trituração e moagem dos pneus:** inicialmente, os pneus inservíveis passam por um processo de trituração e moagem, cujo objetivo é reduzir o material a partículas menores, adequadas para as etapas subsequentes do processo.
- **Separação do aço e do náilon:** durante as etapas de trituração e moagem, ocorre a separação dos componentes metálicos (aço) e das fibras têxteis (náilon) presentes nos pneus. Essa etapa é fundamental, uma vez que apenas a borracha moída é utilizada na composição das misturas asfálticas.

2.3.1 Processos de produção do asfalto-borracha

De acordo com DNIT (2009) existem dois processos de produção do asfalto-borracha. No primeiro, denominado processo úmido, a borracha é triturada e moída e incorporada ao CAP em elevada temperatura. Já no processo de via seca, a borracha triturada é adicionada à

mistura asfáltica como parte dos agregados, sendo chamada de Agregado-borracha. No Brasil, o processo de via úmida é o mais utilizado.

Ainda segundo o DNIT, o processo de via úmida pode apresentar três sistemas diferentes:

- **Sistema *Terminal Blending*:** a borracha é misturada ao ligante em elevadas temperaturas (maiores que 177 °C) por agitação em alto cisalhamento, resultando em uma mistura com menor viscosidade, que pode ser estocada.
- **Sistema *Continuous Blending*:** consiste na produção do asfalto modificado com equipamento misturador na própria obra. Como esse sistema não apresenta homogeneidade e estabilidade, a mistura deve ser aplicada imediatamente após a produção.
- **Sistema *Just-in-time*:** consiste em um processo não estocável em que a borracha moída é incorporada ao CAP minutos antes dos agregados, sob agitação em baixo cisalhamento. Esse processo permite o uso da borracha com granulometrias maiores e aumenta a viscosidade da mistura por meio de um processo de inchamento superficial da borracha nos maltenos do CAP, porém, não ocorre a despolimerização e a desvulcanização.

2.3.2 Desempenho técnico e econômico do pavimento com borracha

O asfalto-borracha apresenta desempenho técnico superior ao de pavimentos asfálticos convencionais, como aqueles executados com CAP 50/70, CBUQ e TSD, principalmente em função da incorporação de aproximadamente 15% de pó de pneus inservíveis ao ligante asfáltico (Oliveira *et al.*, 2025). Essa modificação aumenta a viscosidade, a elasticidade e a aderência do material, resultando em maior flexibilidade, ductilidade e resistência às solicitações do tráfego (Marvila; Tiepo, 2017; Silva; Silva Jr, 2019; Fagundes; Corrês, 2020; Carvalho; Almeida; Junior, 2020; Siqueira *et al.*, 2021; Mignoli *et al.*, 2023; Oliveira; Farias, 2023; Akodedjro, 2024).

Estudos experimentais e análises de desempenho indicam que misturas asfálticas modificadas com borracha apresentam maior resistência à fadiga, menor deformação permanente e melhor comportamento sob ciclos repetidos de carga, quando comparadas às misturas convencionais. A elevada elasticidade do material permite a recuperação parcial das deformações, retardando o surgimento de trincas e falhas estruturais, o que pode resultar em aumento significativo da vida útil do pavimento, conforme sintetizado por Oliveira, Rodgher e Florian (2025)

Além dos ganhos estruturais, a literatura aponta que a presença da borracha melhora propriedades físicas do pavimento, como resistência ao envelhecimento e à oxidação, redução da suscetibilidade térmica, aumento da impermeabilidade e melhor adesividade entre ligante

e agregados, refletindo em maior segurança em pista molhada, redução de ruído e maior conforto aos usuários (Marvila; Tiepo, 2017; Silva; Silva Jr, 2019; Fagundes; Corrês, 2020; Siqueira et al., 2021; Mignoli et al., 2023).

De acordo com o Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO), a análise comparativa dos custos evidencia que o asfalto-borracha apresenta um custo inicial superior ao pavimento convencional. O custo de execução do asfalto-borracha é aproximadamente 15,7% maior em relação ao concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Entretanto, ao considerar os custos de manutenção, verifica-se uma redução significativa, da ordem de 57,1%, em comparação ao pavimento convencional. Como resultado, o custo total ao longo do ciclo de vida do pavimento com asfalto-borracha apresenta uma economia aproximada de 18,4%, evidenciando sua viabilidade econômica a médio e longo prazo, mesmo diante do maior investimento inicial (SICRO, 2017).

A viabilidade econômica dessa tecnologia pode ser ampliada por políticas públicas e incentivos fiscais, como observado em experiências estaduais que reduziram a diferença de custo entre ligantes modificados e convencionais (Pereira, 2021). Além disso, a possibilidade de redução da espessura do revestimento, sem comprometer a capacidade estrutural, também é destacada pelo autor como fator relevante para a diminuição do custo global das obras.

Por fim, Silva e Silva Jr. (2019), Fagundes e Corrês (2020), Oliveira e Farias (2023) e Akodedjro (2024) destacam que o uso do asfalto-borracha gera benefícios econômicos indiretos ao promover a reutilização de pneus inservíveis, reduzindo a demanda por matérias-primas virgens e os custos associados à destinação inadequada desses resíduos. Dessa forma, essa tecnologia se insere nos princípios da economia circular e da pavimentação sustentável.

3. Metodologia

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, com abordagem descritiva e exploratória, desenvolvida por meio de revisão bibliográfica e estudo de caso. A pesquisa bibliográfica teve como objetivo levantar e analisar conceitos, técnicas e resultados relacionados ao uso de pneus inservíveis na pavimentação asfáltica, com ênfase no desempenho técnico, econômico e ambiental do asfalto-borracha.

A revisão da literatura foi realizada a partir de livros técnicos, artigos científicos, trabalhos acadêmicos, normas e documentos institucionais, incluindo publicações de órgãos reguladores e entidades do setor de transportes e pavimentação. Foram priorizadas fontes que abordam a definição de pneus inservíveis, impactos ambientais do descarte inadequado, princípios de sustentabilidade e economia circular, bem como estudos sobre os processos de incorporação da borracha de pneus em misturas asfálticas e o desempenho do asfalto-borracha em comparação aos pavimentos convencionais.

Complementarmente, foi desenvolvido um estudo de caso referente a um projeto executado no estado de Minas Gerais que promoveu a reciclagem de aproximadamente 1,6 milhão de pneus inservíveis para aplicação em pavimentação asfáltica. A análise concentrou-se em trechos de rodovias estaduais que receberam aplicação de asfalto-borracha, conforme informações divulgadas em relatórios técnicos e publicações institucionais do DNIT-MG, com destaque para dados referentes ao período de 2020 a 2024. Foram avaliados aspectos técnicos, ambientais e econômicos da solução adotada, buscando-se relacionar os resultados observados com os dados apresentados na literatura.

Por fim, os dados obtidos na revisão bibliográfica e no estudo de caso foram analisados de forma integrada, permitindo a comparação entre os benefícios teóricos apontados pela literatura e os resultados práticos observados na aplicação do asfalto-borracha. Essa abordagem possibilitou avaliar o potencial do uso de pneus inservíveis como alternativa sustentável para a pavimentação asfáltica, contribuindo para a discussão sobre soluções ambientalmente adequadas no setor rodoviário brasileiro.

4. Aplicação do asfalto-borracha em Minas Gerais

De acordo com o Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG, 2024), nos últimos cinco anos, o Governo de Minas Gerais ampliou em mais de 2.400 % o uso de asfalto-borracha em obras rodoviárias estaduais, passando de 1.107 toneladas, em 2020, para 40.115 toneladas, em 2024. Esse crescimento consolidou o estado como o maior consumidor público desse material no Brasil, com um total acumulado de cerca de 80 mil toneladas no período.

O uso do asfalto-borracha em Minas Gerais tem repercussões ambientais e sociais importantes, uma vez que contribuiu para a retirada de cerca de 1,6 milhão de pneus inservíveis do meio ambiente (DER-MG, 2024), o que reduz o passivo ambiental desse resíduo. Adicionalmente, a aplicação dessa tecnologia auxilia, de forma indireta, na redução de emissões de carbono, equivalente à preservação de mais de 40 mil árvores ao evitar a produção de ligantes convencionais, e promove maior durabilidade das pavimentações, com menor necessidade de manutenção e reparos ao longo do tempo (DER-MG, 2024).

Essa experiência estadual evidencia como políticas públicas de infraestrutura podem associar desempenho técnico e sustentabilidade ambiental, reforçando o papel de soluções como a pavimentação com asfalto-borracha no contexto das estratégias de economia circular e gestão de resíduos sólidos no setor rodoviário brasileiro.

A Figura 1 apresenta os principais trechos de rodovias em obras no estado de Minas Gerais, destacando os locais onde o asfalto-borracha foi aplicado, evidenciando a adoção de soluções de pavimentação sustentável.



Figura 1 – Rodovias em obras no estado de Minas Gerais com aplicação de asfalto-borracha. Fonte: DER-MG(2024)

6. Considerações Finais

O presente estudo indicou, com base em uma revisão de literatura, que a utilização de pneus inservíveis na pavimentação asfáltica, por meio do asfalto-borracha, oferece uma solução integrada entre desempenho técnico, sustentabilidade ambiental e eficiência econômica. A análise do caso de Minas Gerais evidenciou que programas de investimento e políticas públicas estruturadas permitem a incorporação significativa de resíduos, contribuindo para a redução do passivo ambiental e aumentando a durabilidade das rodovias.

Do ponto de vista técnico, o asfalto-borracha proporciona maior flexibilidade, resistência à fadiga e menor deformação permanente em comparação aos pavimentos convencionais, prolongando o ciclo de vida das vias e reduzindo a necessidade de intervenções corretivas. Sob o aspecto ambiental, a reutilização de pneus reduz a disposição inadequada desses resíduos e minimiza as emissões associadas à produção de ligantes convencionais, alinhando-se aos princípios da economia circular.

No entanto, alguns processos de produção, como a despolimerização e a desvulcanização da borracha, ainda apresentam impactos ambientais e demanda energética consideráveis, reforçando a importância de escolhas tecnológicas conscientes e da avaliação do ciclo de vida das misturas asfálticas.

Em síntese, a pavimentação com asfalto-borracha se apresenta como uma alternativa viável e estratégica para o setor rodoviário brasileiro, capaz de integrar sustentabilidade, economia

e desempenho técnico, desde que acompanhada de planejamento adequado, controle de qualidade e políticas de incentivo. A experiência mineira demonstra que a adoção de diretrizes institucionais e investimentos contínuos pode viabilizar a aplicação dessa tecnologia em larga escala, servindo como referência para outros estados brasileiros, especialmente por meio da incorporação de critérios de sustentabilidade em editais de licitação e políticas públicas voltadas à infraestrutura viária.

Referências

AKODEDJRO, E. O asfalto-borracha em Benim: estudo bibliográfico, viabilidade e desempenho estrutural. 2024. 48 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2024. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br/server/api/core/bitstreams/b52de641fd57437ca625463fa2ea1b5a/content>. Acesso em: Dezembro de 2025.

AMARAL, R. S.; SILVA, D. S.; COSTA, F. P. Pavimentação urbana: desafios e soluções. São Paulo: Barbato Engenharia, 2021. Disponível em : <https://barbatoeng.com.br/pavimentacao-urbana/>. Acesso em: Dezembro de 2025.

ANDRIETTA, A. J. Pneus e meio ambiente: um grande problema requer uma grande solução. Out. 2002. Disponível em: <http://www.reciclarepreciso.hpg.ig.com.br/recipepneus.htm>. Acesso em: Dezembro de 2025.

ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. Produção e vendas. [S. l.], 2024. Disponível em: <http://www.anip.com.br/arquivos/producao-vendas.pdf>. Acesso em: Dezembro de 2025.

BARAT, J. A evolução dos transportes no Brasil. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 1978.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.

BRASIL. *Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)*. Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 30 set. 2009. Disponível em: https://servicos.ibama.gov.br/ctf/manual/html/res_con_416_09.pdf. Acesso em: Dezembro de 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 258, de 26 de agosto de 1999. Dispõe sobre a destinação final ambientalmente adequada de pneus inservíveis. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2 dez. 1999.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT de Rodovias 2023. Brasília: CNT, 2023. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br>. Acesso em: Dezembro de 2025.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE MINAS GERAIS – DER-MG. *Em cinco anos, Governo de Minas amplia em mais de 2.400 % o uso do asfalto borracha nas rodovias do estado. Minas Gerais*, 12 Dez. 2024. Disponível em: <https://der.mg.gov.br/noticias/3843-em-cinco-anos-governo-de-minas-amplia-em-mais-de-2-400-o-uso-do-asfalto-borracha-nas-rodovias-do-estado>. Acesso em: Janeiro de 2026.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Manual de pavimentação. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Diretrizes básicas para obras rodoviárias sustentáveis. Brasília: DNIT, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Brasil em síntese: território e população. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: Dezembro de 2025.

EMBRAPA. *Reciclagem de pneus inservíveis: avanços, aplicações e perspectivas no Brasil*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/objetivos-de-desenvolvimento-sustentaveis/busca-de-noticias/-/noticia/103505979/artigo---reciclagem-de-pneus-inserviveis-avancos-aplicacoes-e-perspectivas-no-brasil>. Acesso em: Dezembro de 2025.

MIGNOLI, J. R. et al. Avaliação do desempenho funcional e estrutural de pavimentos com asfalto-borracha. **Revista Brasileira de Engenharia Civil**, v. 9, n. 1, p. 33–45, 2023.

OLIVEIRA, A. S.; FARIAS, M. M. Análise econômica e ambiental do uso de asfalto-borracha em rodovias brasileiras. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 12, n. 2, p. 215–231, 2023.

OLIVEIRA, Felipe Lima de; RODGHER, Sandra Fabiana; FLORIAN, Fabiana. *Vantagens da utilização de asfalto borracha na pavimentação: uma revisão bibliográfica*. RECIMA21 – **Revista Científica Multidisciplinar**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. e617028, 2025. DOI: 10.47820/recima21.v6i1.7028. Disponível em: <https://recima21.com.br/recima21/article/view/7028>. Acesso em: Dezembro de 2025.

PARRA, C. V.; NASCIMENTO, A. P. B. do; FERREIRA, M. L. Reutilização e reciclagem de pneus, e os problemas causados por sua destinação incorreta. In: *ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA; ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO*, XIV, X, ano, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: Universidade Nove de Julho, 2010. Disponível em: <https://www.inicepg.univap.br> . Acesso em : 2025.

PEREIRA, L. A. Viabilidade econômica do uso de asfalto-borracha: impactos de incentivos fiscais no estado do Paraná. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

PETROBRAS. Pavimento modificado com borracha de pneus: aspectos técnicos e operacionais. Rio de Janeiro: Petrobras, 2003.

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS – *SICRO*. Brasília, 2017.

SILVA, R. F.; SILVA JÚNIOR, J. A. Desempenho mecânico e econômico de pavimentos com ligantes asfálticos modificados. **Revista Engenharia Civil**, v. 25, n. 1, p. 55–70, 2019.

SIQUEIRA, J. P. et al. Avaliação da durabilidade de pavimentos asfálticos modificados com borracha de pneus. **Revista Transportes**, v. 29, n. 2, p. 115–128, 2021.

SOUZA, L. D. F.; MOTA, K. R. R. Estudo Comparativo da Viabilidade do Asfalto Convencional e o Asfalto-Borracha nas Vias Urbanas do Bairro Campestre em Monte Carmelo-MG. Monte Carmelo. 2019.

THILAKSHAN, T., BANDARA, S. Identification of Relevant Sustainable Transportation Links to Sustainable Development Goals (SDGs) in the National Context. 2019.

VUCKOVIC, N. F. *Avaliação de alternativas para descarte e reuso de pneus: incorporação na massa asfáltica para produção de asfalto-borracha*. 2021. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/items/c78a00e4-b4ae-4471-95e1-2b42f2418c2d>. Acesso em: Dezembro de 2025.