

# A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEUS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS DE TRÁFEGO LEVE

**Frayanne Fernandes Prazeres<sup>1</sup>**

**Me. Franklin Roosevelt do Ó<sup>2</sup>**

**Ma. Valdilea Ferreira Lopes<sup>3</sup>**

## **Resumo**

A utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos de tráfego leve é uma solução sustentável para o descarte inadequado desses materiais. Os pneus descartados são um problema ambiental global, pois contêm substâncias poluentes que demoram a se decompor. O descarte inadequado dos pneus também causa danos ao ecossistema e propagação de doenças. A logística reversa, que envolve a coleta e reutilização de resíduos, é uma estratégia importante para lidar com esse problema. Políticas ambientais e regulamentações têm sido implementadas para incentivar fabricantes, distribuidores e consumidores a serem responsáveis pelo retorno dos pneus ao mercado. Os resíduos de borracha de pneus podem ser adicionados aos pavimentos asfálticos de diferentes maneiras, como pelo processo úmido ou seco. Essa adição altera as propriedades químicas e físicas do asfalto, melhorando a durabilidade dos pavimentos. Estudos mostram que a presença de borracha na mistura de asfalto reduz a fadiga e melhora o desempenho dos pavimentos. A utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos de tráfego leve é viável tecnicamente, pois melhora as propriedades mecânicas do asfalto e prolonga a vida útil dos pavimentos. Além disso, é ambientalmente benéfica, pois reduz a quantidade de resíduos gerados e contribui para a sustentabilidade. Entretanto, continuam existindo obstáculos a serem vencidos, como a falta de incentivos e políticas públicas para a reciclagem de pneus, além da dificuldade de acesso a pneus descartados em locais remotos.

**Palavras-chave:** Resíduos de borracha. Pavimentos asfálticos. Logística reversa.

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Civil pela Faculdade Edufor São Luís. E-mail: frayanne.fernandes.prazeres@alunoedufor.com.br

<sup>2</sup> Mestre em Engenharia Elétrica. E-mail: franklin.doo@edufor.edu.br

<sup>3</sup> Mestre em Construções Civil. E-Mail:valdilea.ferreira@edufor.edu.br

**Abstract**

The use of waste rubber from tires in asphalt pavements for light traffic is a sustainable solution to the improper disposal of these materials. Discarded tires are a global environmental problem as they contain pollutants that take a long time to decompose. Improper tire disposal also causes damage to the ecosystem and the spread of diseases. Reverse logistics, involving the collection and reuse of waste, is an important strategy for addressing this issue. Environmental policies and regulations have been implemented to encourage manufacturers, distributors, and consumers to take responsibility for the return of tires to the market. Waste rubber from tires can be added to asphalt pavements in different ways, such as through the wet or dry process. This addition alters the chemical and physical properties of the asphalt, improving the durability of the pavements. Studies show that the presence of rubber in the asphalt mixture reduces fatigue and enhances pavement performance. The use of waste rubber from tires in asphalt pavements for light traffic is technically feasible as it improves the mechanical properties of the asphalt and extends the lifespan of the pavements. Additionally, it is environmentally beneficial as it reduces the amount of waste generated and contributes to sustainability. However, there are still obstacles to be overcome, such as the lack of incentives and public policies for tire recycling, as well as the difficulty of accessing discarded tires in remote locations.

**Keywords:** Rubber waste. Asphalt pavements. Reverse logistics.

## 1. Introdução

O uso do pneu é imprescindível para a grande maioria dos meios de transporte da sociedade contemporânea, o que tem contribuído para um aumento significativo do seu consumo em todo o mundo. Entretanto, sua difícil decomposição na natureza tem tornado os pneus um dos resíduos mais problemáticos. Quando descartados, esses materiais levam mais de 500 anos para se decompor, o que os torna frequentes em aterros sanitários (PNEWS, 2013).

No Brasil, aproximadamente 90 milhões de unidades de pneus são descartadas anualmente (SEST SENAT, 2021). Para evitar o descarte inadequado deste material, a Resolução nº 416 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2009) determinou que, para cada pneu novo vendido, as empresas responsáveis pela fabricação deverão dar uma destinação correta a um pneu usado, o que equivale a uma coleta de aproximadamente 90 milhões de pneus anualmente, contribuindo para a preservação ambiental.

O descarte inadequado desses materiais tem causado sérios danos ao meio ambiente e à saúde pública. Diante desse cenário, diversas iniciativas têm sido desenvolvidas visando minimizar os impactos negativos causados pelos resíduos de pneus. Uma das alternativas que tem se destacado é a incorporação de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos de tráfego leve. Essa prática consiste em utilizar os pneus descartados como parte da composição do asfalto, promovendo a reciclagem desses materiais e conferindo maior durabilidade e desempenho ao pavimento.

A adição de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos traz uma série de benefícios. Pesquisas indicam que essa abordagem auxilia na diminuição da quantidade de resíduos produzidos, mitigando os efeitos prejudiciais ao meio ambiente decorrentes da disposição incorreta dos pneus. Além disso, a utilização de pneus incorporados ao asfalto melhora propriedades mecânicas do pavimento, tais como resistência à deformação permanente e à fadiga.

Pesquisas têm apontado que a adição de resíduos de borracha de pneus também proporciona redução de ruídos, o que contribui para a diminuição da poluição sonora nas vias urbanas. Além disso, a temperatura da superfície da estrada é reduzida, o que contribui para o conforto dos usuários e minimiza o desgaste dos veículos.

Diante dos benefícios ambientais e técnicos apresentados, torna-se fundamental avaliar a viabilidade técnica, ambiental e econômica da utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos de tráfego leve. Nesse contexto, o presente artigo visa

principalmente analisar o desempenho mecânico do pavimento com a adição desses resíduos, além de destacar os benefícios que essa prática traz para a preservação ambiental e para a qualidade das estradas e ruas.

Por meio dessa avaliação, busca-se fornecer recomendações que incentivem a adoção dessa prática tanto por empresas quanto por governos, contribuindo para a promoção de soluções que conciliem a melhoria das condições das vias com a preservação do meio ambiente. Acredita-se que os resultados obtidos neste estudo possam auxiliar na disseminação e implementação dessa alternativa em âmbito global.

Dessa forma, o presente artigo se configura como uma importante contribuição para o avanço do conhecimento científico sobre o tema e para a busca de soluções sustentáveis na gestão dos resíduos de pneus. Através da valorização desses materiais descartados, é possível promover a preservação ambiental, melhorar a qualidade das vias e proporcionar benefícios econômicos, consolidando-se como uma alternativa viável e eficiente para a construção e manutenção de pavimentos asfálticos de tráfego leve.

## 2. Pneus, logística reversa e seus descarte inadequados

A composição de um pneu convencional, utilizado em veículos de passeio, é formada por uma variedade de componentes químicos e estruturas, incluindo borracha natural e sintética. Ao analisar o corte radial ilustrado na Figura 1, é possível identificar com precisões diversas estruturas que compõem um pneu (SANTOS; LIMA, 2021).

**Figura 1:** Partes do pneu



**Fonte:** <https://www.blog.acheipneus.com.br>, 2021.

Ao longo do tempo, os pneus gradualmente se degradam e se tornam inutilizáveis, resultando em resíduos sólidos altamente poluentes para o meio ambiente. Além da borracha,

sua composição inclui vários metais pesados prejudiciais ao solo, como cádmio, chumbo e zinco. Portanto, tornou-se necessário desenvolver medidas de controle para o descarte adequado dos pneus sem utilidade, em paralelo com a produção dos mesmos (SANTOS; LIMA, 2021).

O descarte inadequado de pneus é um problema ambiental global. Esses materiais são compostos por substâncias que levam muitos anos para se decompor naturalmente e, quando descartados de forma inadequada, acumulam-se em aterros sanitários, terrenos baldios, margens de rios, entre outros locais, prejudicando o meio ambiente e a saúde humana.

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), os pneus descartados representam um problema significativo, pois se tornam criadouros para mosquitos transmissores de doenças como dengue, Zika e Chikungunya, assim como exposto na figura 2. Além disso, a queima desses pneus libera gases tóxicos na atmosfera, contribuindo para a poluição do ar e o aquecimento global. O abandono desse material no meio ambiente resulta na disseminação de doenças, que podem ser potencialmente letais para os seres humanos, e causa uma cadeia de contaminação por poluentes sólidos, líquidos e gasosos, comprometendo o ecossistema como um todo (CHRISTÓFANI, 2017).

**Figura 2:** Pneus descartados de forma incorreta



**Fonte:** Christófani et al. (2017)

As preocupações relacionadas aos aspectos ambientais envolvem o fluxo de produção e pós-consumo de produtos, sendo denominadas como logística reversa. O conceito de logística reversa busca garantir o descarte adequado, a quantificação do volume de resíduos gerados e a proposta de reaproveitamento dos materiais. Esse conceito é representado no cicloapresentado na Figura 3, conforme mencionado por Leite et al. (2017).

**Figura 3:** Ciclo da logística reversa



**Fonte:** <https://dpadv.com.br>, 2021.

A estratégia de logística reversa, por meio do reaproveitamento, consiste em uma análise embasada em parâmetros de sustentabilidade, revelando o impacto que o consumo possui na sociedade. Essa estratégia é considerada um instrumento de desenvolvimento econômico, social e ambiental, envolvendo um conjunto de ações destinadas à coleta e devolução de resíduos sólidos ao setor empresarial (SOARES et al., 2016).

A premissa é que o fabricante, o distribuidor, o comerciante e o consumidor final do produto assumam a responsabilidade pelo retorno dos produtos ao mercado, permitindo um detalhamento da quantidade total de consumo. Além disso, é obrigatório apresentar relatórios com informações sobre a quantidade e o percentual de resíduos efetivamente encaminhados para indústrias de reciclagem. Isso configura uma política de responsabilidade compartilhada (FERNANDES et al., 2020).

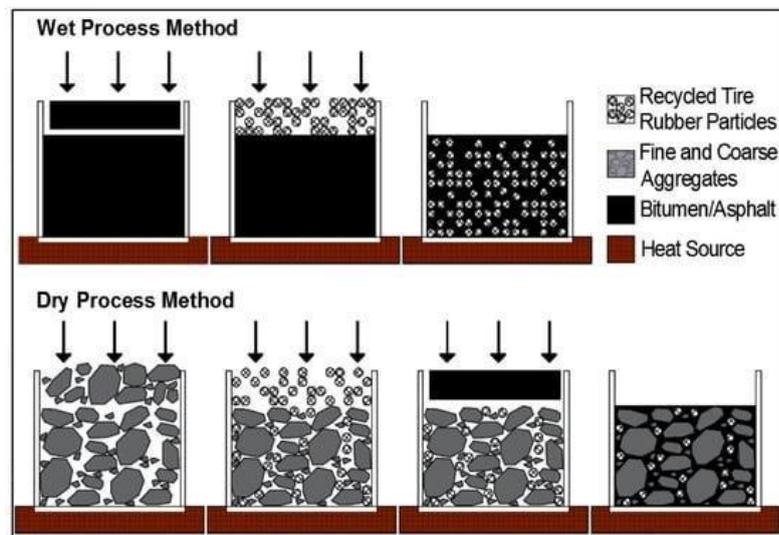
Políticas ambientais, como a Resolução nº 416/09 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) instituída pela Lei 12.305/10, são fundamentais para embasar a logística reversa, especialmente no caso dos pneus de borracha, no que diz respeito à prevenção da transformação ambiental provocada por pneus inutilizáveis e seu descarte adequado (GONÇALVES et al., 2019).

No entanto, apesar dos benefícios da reciclagem, ainda há muitos desafios a serem enfrentados. Um dos principais problemas é a falta de incentivos e políticas públicas que estimulem a reciclagem de pneus. Além disso, há um grande número de pneus descartados em locais de difícil acesso, o que torna o processo de recolhimento e transporte mais complexo.

### 3. Resíduos de borracha em pavimentos asfálticos

A adição de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos é feita através de diferentes métodos. Segundo o autor Ahmed (2020), a adição pode ser realizada por meio da técnica do "wet process" (processo úmido), onde a borracha é misturada com o asfalto líquido antes da aplicação no pavimento, ou pela técnica do "dry process" (processo seco), onde a borracha é adicionada ao pavimento já existente através de uma usina de reciclagem de asfalto, como mostra a Figura 4.

**Figura 4:** Métodos adição de resíduos de borracha de pneus



Fonte: AHMED (2020)

No processo úmido, a borracha granulada é adicionada ao cimento asfáltico para modificar as propriedades químicas e físicas do cimento utilizado na produção de pavimentos emborrachados (TAKALLOU, 1991).

O processo úmido foi introduzido no início dos anos 1970 como uma solução para evitar a reflexão precoce de trincas por fadiga em pavimentos recapeados. Nesse método, de 18% a 22% de borracha granulada em peso do ligante é misturada com cimento asfáltico quente e diluída com um óleo extensor para facilitar a aplicação (ASTM, 2017).

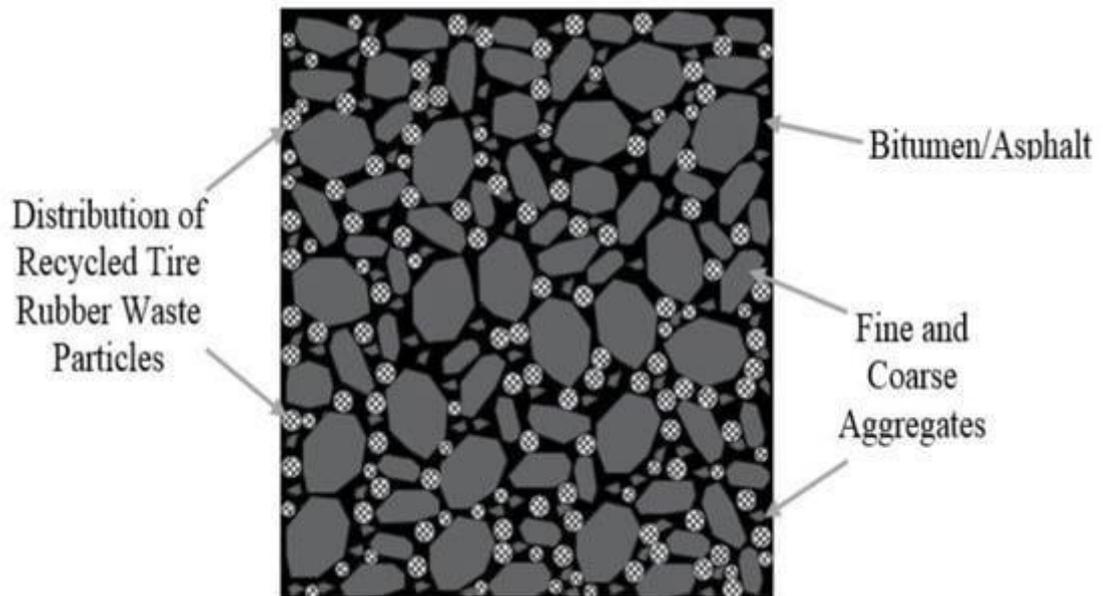
No processo seco, parte do agregado nas misturas asfálticas é substituída por resíduos de borracha granulada. Dois sistemas utilizam o processo seco: o sistema Plus Ride e o sistema genérico. O sistema Plus Ride foi desenvolvido pelas empresas suecas Skega AB e AB Vägförbättringar (ABV) na década de 1960; ele normalmente utiliza, em peso da mistura total, 3% de partículas de borracha granulada grossa e fina para substituir parte do agregado na mistura. No sistema genérico, a granulometria da borracha é modificada para ser compatível com as granulometrias dos agregados em taxas de 1%, 2% e 3% de borracha. Esse

sistema foi criado em 1989 por H. B. Takallou, e ele utiliza projetos de misturas e padrões similares ao do concreto asfáltico convencional (TAKALLOU, 1991).

Segundo Gong et al. (2019) as aplicações do processo seco são mais restritas em comparação com o processo úmido. Embora o uso do processo seco seja mais simples do que o método úmido, as misturas asfálticas preparadas por meio do processo seco podem apresentar instabilidade volumétrica e redução da resistência, devido à substituição parcial dos agregados por grânulos de borracha. A resistência de matrizes de pedra processadas a seco, contendo partículas de borracha de pneus pré-revestidas com cimento. Os resultados revelaram que a matriz asfáltica com agregado de borracha pré-revestida demonstrou maior resistência e melhor desempenho em comparação com a mistura contendo agregado de borracha não tratada.

A Figura 5 mostra um padrão típico de distribuição de resíduos de borracha de pneus reciclados no asfalto borracha. A incorporação de resíduos de borracha de pneus reciclados em misturas asfálticas tem um impacto nas características gerais do ligante. Por exemplo, Khalili et al. (2019) descobriram que o tamanho, forma e quantidade de partículas de borracha influenciam significativamente as propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado. Kim et al. (2019) realizaram um estudo sobre o comportamento de fluxo, elasticidade, capacidade de carga e dependência de temperatura de ligantes modificados com borracha granulada. Seus resultados indicaram que a incorporação de borracha granulada como modificador aumentou a viscosidade do ligante, alterou as características de fluxo de newtoniano para fluxo tixotrópico, reduziu os valores de deformação por fluência, melhorou a elasticidade e a rigidez, aumentou o módulo complexo em temperaturas mais altas e reduziu o ângulo de fase em temperaturas mais baixas.

**Figura 5:** Ilustração da distribuição de resíduos de borracha de pneus reciclados em asfalto borracha.



**Fonte:** Khalili (2019)

Mashaan e Karim (2020) investigaram o impacto de diferentes teores de borracha granulada nas propriedades do ligante asfáltico modificado com borracha. Seus resultados mostraram que a elevação da concentração de borracha resultou em um aumento do módulo de cisalhamento complexo, do módulo de armazenamento e do módulo de perda do ligante asfáltico modificado com borracha. Xie et al. (2019) relataram que o uso de borracha granulada ativada no ligante asfáltico melhorou o módulo de rigidez e as propriedades de fluência do ligante em diferentes temperaturas.

De acordo com a pesquisa realizada por Wang et al. (2020), a interação entre asfalto e borracha depende muito da temperatura de mistura e do tempo. Outros estudos também indicaram que a incorporação de resíduos de borracha de pneus reciclados em misturas asfálticas reduz a suscetibilidade térmica (LIANG,2015) (PRESTI,2013), diminui a penetração, aumenta o ponto de amolecimento e, conseqüentemente, melhora a estabilidade das misturas asfálticas (HINISLIOGLU,2004) (AL-HADIDY 2009). Além disso, a superfície rugosa das partículas de borracha granulada aumenta a coesão entre o asfalto e as partículas de borracha, melhorando assim a funcionalidade e o desempenho dos asfaltos modificados com borracha granulada (WANG, 2011).

#### **4. Viabilidade técnica, ambiental e econômica da utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos de tráfego leve**

##### **4.1. Viabilidade técnica**

A aplicação de resíduos de borracha provenientes de pneus em pavimentos asfálticos destinados a tráfego de baixa intensidade tem se mostrado uma alternativa viável e sustentável nos últimos anos. Essa prática tem sido objeto de estudos e pesquisas devido à sua capacidade de melhorar as propriedades mecânicas do asfalto, além de reduzir a quantidade de resíduos gerados. Essa abordagem é especialmente adequada para pavimentos de tráfego leve, proporcionando benefícios como a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, a diminuição dos custos de manutenção das estradas e o prolongamento da vida útil dos pavimentos.

A durabilidade dos pavimentos de asfalto, por sua vez, é amplamente definida como a capacidade de manter a integridade estrutural ao longo de sua vida útil projetada, mesmo quando expostos a diferentes ambientes e condições de tráfego. Diversos fatores influenciam a durabilidade desses pavimentos, como o design da mistura, as propriedades do ligante, a adequação da drenagem e os métodos de construção (BONAQUIST,2014).

Um estudo conduzido por Mashaan (2012) investigou o desempenho de durabilidade de ligantes asfálticos modificados com borracha e descobriu que a incorporação de borracha de pneus moídos nas misturas de asfalto pode melhorar as propriedades de desempenho dos pavimentos, especialmente em termos de resistência à deformação sob condições de construção e tráfego. Outras pesquisas também indicaram que a presença de borracha na mistura de asfalto torna o pavimento modificado com asfalto-borracha menos suscetível à fadiga (PETERSEN, 1984).

A Figura 6 ilustra o trincamento por fadiga, um dos danos mais frequentes em pavimentos de asfalto. O trincamento por fadiga é classificado como trincamento térmico ou trincamento por fadiga associada à carga.

**Figura 6:** Rachaduras por fadiga em pavimentos de asfalto.



**Fonte:** MASHAAN (2012)

O trincamento térmico ocorre como resultado de uma combinação de tensão de tração térmica juntamente com a tensão aplicada pelo tráfego. A fadiga associada à carga inicia quando tensões repetidas ou flutuantes, que fazem com que o pavimento se flexione, e a base da camada de asfalto atingem a tensão de tração máxima, resultando em várias fraturas e fadigas na superfície do pavimento. As trincas por fadiga continuam a se propagar com o aumento da carga de tráfego e aparecem como trincas longitudinais conectadas a trincas transversais, formando um padrão semelhante à teia de uma aranha na superfície do pavimento, como mostrado na Figura 3.

Uma vez que a resistência ao trincamento por fadiga depende da resistência à tração e das propriedades elásticas da mistura de asfalto [63], a adição de borracha granulada à mistura de asfalto provou melhorar as propriedades elásticas, melhorando assim a resistência às tensões de tração causadas por cargas de tráfego repetidas (MASHAAN, 2012).

Wang (2013) investigou os efeitos do tipo de granulometria, teor de asfalto, temperatura de teste, razão de tensão, frequência de carga, concentração de pó de borracha e tamanho da borracha na vida de fadiga e crescimento de trincas da mistura de asfalto modificada com borracha granulada. Seus resultados mostraram que a mistura de asfalto-borracha com 20% de concentração de borracha granulada apresentava a melhor propriedade anti-fadiga.

Da mesma forma, Mashaan (2019) examinou o efeito do teor de borracha no desempenho do asfalto modificado com borracha granulada e constatou que o aumento do teor de borracha melhorou a resistência ao trincamento por fadiga. No entanto, verificou-se

que o aumento do teor de borracha em 16% e 20% aumentou a viscosidade do ligante até um limite em que se tornou impraticável para a construção em campo.

Vários estudos têm demonstrado que a adição de borracha de pneus moídos em misturas de asfalto aumenta a elasticidade, flexibilidade e durabilidade do asfalto contra o envelhecimento (KHALILI, 2019) (AFLAKI, 2011).

O envelhecimento do asfalto ocorre durante o processo de mistura, construção e ao longo da vida útil do pavimento. Esse processo pode levar a rachaduras prematuras e desintegração da superfície do pavimento. Durante o envelhecimento, as misturas de asfalto tendem a se tornar frágeis e suscetíveis a danos devido à oxidação (envelhecimento), volatilização (evaporação de componentes leves durante a produção de asfalto quente em altas temperaturas), polimerização (aumento da fragilidade devido à combinação de resinas e asfalto) e tixotropia (aumento da viscosidade ao longo do tempo) (ALI, 2013).

Por exemplo, Khalili et al. (2019) realizaram testes de forno de filme fino rolante (RTFO) e vaso de envelhecimento sob pressão (PAV) para avaliar os efeitos do envelhecimento em ligantes asfálticos misturados com resíduos de borracha de pneus. Seus resultados mostraram que o componente elástico do módulo de cisalhamento dinâmico aumentou com o aumento do teor de borracha, tanto para ligantes asfálticos envelhecidos quanto não envelhecidos.

Segundo Wang (2013), a adição de borracha de pneus moídos ao ligante asfáltico pode aumentar a resistência ao envelhecimento devido à presença de elementos anti-envelhecimento, como o carbono preto, presente nas partículas de borracha moída. Além disso, a adição de borracha de pneus moídos ao ligante asfáltico aumenta a espessura do filme de asfalto na superfície do agregado, o que contribui para uma maior resistência ao envelhecimento.

Em termos de desempenho em campo, vários estudos foram realizados para investigar o desempenho de pavimentos de asfalto com borracha construídos nos Estados Unidos, principalmente em regiões de clima quente (KHALILI, 2019). Por exemplo, na Califórnia, embora alguns pavimentos tenham apresentado desgaste prematuro devido à falta de experiência, vários pavimentos de asfalto com borracha exibiram excelente desempenho por até 15 a 20 anos quando projetados e construídos corretamente. De acordo com Khalili et al. (2019) os danos nos pavimentos de asfalto com borracha que apresentaram bom desempenho progrediram em uma taxa muito mais lenta em comparação com os pavimentos de asfalto convencionais.

## 4.2. Viabilidade Econômica

A utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos de tráfego leve não só é viável tecnicamente, mas também economicamente vantajosa. Isso porque a incorporação desses resíduos na mistura asfáltica reduz os custos de produção e manutenção das estradas, além de contribuir para a redução de custos ambientais.

Uma das principais considerações no início da produção de asfalto modificado com borracha como uma alternativa para melhorar certas características do asfalto convencional foi a análise da viabilidade econômica. Isso envolveu a comparação dos custos de produção entre os dois tipos de asfalto, de forma a tornar a modificação com borracha não apenas vantajosa em termos técnicos, mas também financeiramente (RODRIGUES; PAES; SILVA, 2019).

No aspecto econômico, não se trata apenas do custo inicial do asfalto modificado com borracha em comparação com o asfalto convencional. Ao realizar essa análise comparativa, é essencial considerar integralmente todo o ciclo de produção, aplicação e manutenção (GRECA ASFALTOS, 2019).

Análises foram realizadas em estradas brasileiras para avaliar o investimento inicial na modificação do asfalto com borracha, os custos do processo de fabricação e o custo final, permitindo assim uma comparação com os custos de manutenção das estradas após alguns anos de uso (RODRIGUES; PAES; SILVA, 2019).

O Quadro 1 apresenta uma comparação entre o custo e a qualidade do revestimento asfáltico convencional e do revestimento asfáltico modificado com borracha, fornecendo um custo total da obra para ambos os tipos de revestimentos.

**QUADRO 1:** Comparativo do revestimento convencional x revestimento asfalto-borracha

GRANDEZAS		CÁLCULO	UNIDADE	TIPO DE ASFALTO	
				CAP 50/70	ASFALTO BORRACHA (ECOFLEX)
A	Quantidade de massa asfáltica CBUQ produzida		ton	26.250	18.375
B	Custo de Usinagem/ Aplicação por tonelada de CBUQ aplicado		R\$ / ton	200,00	230,00
C	Quantidade de massa x Custo de Usinagem / Aplicação	AxB	R\$	5.250.000,00	4.226.250,00
D	Teor de Asfalto		% peso	5%	5,5%
E	Custo de asfalto por tonelada		R\$ / ton	1.150,00	1.550,00
F	Custo de asfalto no CBUQ	A x D x E	R\$	1.509.375,00	1.566.468,75
G	Custo total de obra	C + F	R\$	6.759.375,00	5.792.718,75

FONTE: GRECA ASFALTOS, 2019.

No quadro 2, é apresentada uma tabela com informações referentes aos custos de manutenção e execução das massas asfálticas.

**QUADRO 2:** Comparação de custos entre manutenção e execução de revestimento convencional e revestimento de asfalto-borracha.

GRANDEZAS		CÁLCULO	UNIDADE	TIPO DE ASFALTO	
				CAP 50/70	ASFALTO BORRACHA (ECOFLEX)
A	Execução do pavimento com preparo de base em extensão		m	200	200
B	Custo de execução do pavimento com preparo de base		R\$ / m <sup>2</sup>	46,66	77,22
C	Manutenção do pavimento com preparo de base		R\$ / m <sup>2</sup>	70%	10%
D	Custo geral da manutenção do pavimento		R\$ / m <sup>2</sup>	67,30	67,30
E	Percentual de custo x manutenção do pavimento	C x D	R\$ / m <sup>3</sup>	47,11	6,73
F	Custo de execução + manutenção do pavimento	B + E	R\$ / m <sup>2</sup>	93,77	83,95

FONTE: ZATARINI, et al., 2017.

De forma similar, foi realizada uma análise de custo para uma obra de restauração que abrange uma extensão de 30 km. O projeto propõe a utilização de uma camada de concreto asfáltico utilizando o ligante CAP-50/70 como revestimento, tendo uma espessura de 5 cm (referência: GRECA ASFALTOS, 2009).

A seguir, são fornecidos os Quadros 3 e 4, que apresentam os orçamentos para um revestimento utilizando asfalto-borracha.

**QUADRO 3:** Quantidade de massa asfáltica produzida.

REVESTIMENTO CONVENCIONAL	EM CBUQ	REVESTIMENTO EM CBUQ COM ASFALTO BORRACHA COM REDUÇÃO DE 30%
30.000m x 7,00m x 0,05m x 2,5 t/m <sup>3</sup> = 26.250 toneladas de massa asfáltica de CBUQ normal		30.000m x 7,00m x 0,035m x 2,5 t/m <sup>3</sup> = 18.375 toneladas de massa asfáltica de CBUQ com asfalto borracha

**FONTE:** GRECA ASFALTOS, 2019.

**QUADRO 4:** Valor por tonelada para a produção de asfalto

CBUQ com CAP 50/70	R\$200,00 por tonelada
CBUQ com Asfalto borracha	R\$230,00 por tonelada

**FONTE:** GRECA ASFALTOS, 2019.

Segundo a Greca Asfaltos (2019):

Pode-se perceber, portanto, que o custo de execução do asfalto borracha é aproximadamente 15% superior ao custo de execução do asfalto CBUQ convencional. Essa diferença de preço é atribuída aos gastos adicionais necessários para elevar as temperaturas de processamento da mistura asfáltica e melhorar a eficiência na compactação do revestimento.

Com base nos resultados obtidos, podemos observar que a aplicação do asfalto- borracha apresenta benefícios significativos. Foi constatado que a utilização dessa tecnologia reduz a espessura necessária para o reforço em aproximadamente 30%, resultando em uma diminuição de cerca de 14% no custo total da obra em comparação ao asfalto convencional. Além disso, esse tipo de pavimento requer menor demanda de manutenção ao longo do tempo.

### 4.3. Viabilidade Ambiental

A utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos de tráfego leve também apresenta vantagens ambientais.

Do ponto de vista ambiental, existem aspectos positivos e negativos a serem considerados. Alguns pontos destacados a seguir enfatizam características relacionadas à viabilidade ambiental, tanto no processo de reutilização de pneus descartados quanto na produção de asfalto modificado, que envolve métodos prejudiciais ao meio ambiente, assim como o asfalto convencional (RODRIGUES; PAES; SILVA, 2019).

Um ponto positivo é a economia de recursos naturais proporcionada pela reciclagem de pneus, que resulta em menor consumo de combustíveis não renováveis, como carvão e óleo, devido ao poder calorífico dos pneus (SANTOS; BOTINHA; LEAL, 2013). Além disso, o uso de asfalto modificado com borracha reduz a demanda por petróleo e asfalto, aumentando a durabilidade e vida útil do pavimento, o que resulta em menor necessidade de manutenção (NOHARA et al., 2005).

Outro benefício é a redução dos riscos de incêndios e desastres ambientais. Descartes inadequados de pneus em locais irregulares podem interferir no fluxo de rios e lagos, ao mesmo tempo em que deixa partes do solo sem cobertura, sofrendo degradação e representando perigos, conforme mencionado por Beduschi (2014).

A inclusão de borracha como modificador do asfalto também leva à diminuição da quantidade de petróleo utilizado, o que é benéfico para o meio ambiente, de acordo com Santos, Botinha e Leal (2013).

Além disso, a utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos reduz as emissões de gases do efeito estufa. Ao ser descartado em aterro sanitário, os pneus desperdiçam seu potencial energético e contribuem para a emissão de metano na atmosfera. Da mesma forma, a queima dos pneus resulta na perda de energia e na emissão de CO<sub>2</sub>. No entanto, uma alternativa sustentável é utilizar a borracha de pneus na composição do asfalto, o que evita a perda de energia e a emissão de poluentes na atmosfera (SÃO PAULO, 2023).

No entanto, é importante ressaltar que a viabilidade ambiental da utilização daqueles resíduos também depende de fatores como a qualidade do material utilizado na mistura asfáltica, a disposição dos resíduos gerados no processo e as condições ambientais da região.

## **5. Recomendações de incentivo e a adoção da prática.**

A utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos é uma prática sustentável que tem sido amplamente estudada e adotada em vários países, devido aos benefícios ambientais e econômicos que proporciona. No entanto, a adoção dessa prática ainda é baixa em muitos lugares. Neste artigo, serão apresentadas algumas recomendações para incentivar a adoção da prática de utilização desses resíduos.

Uma das recomendações é a realização de campanhas de conscientização para educar os cidadãos sobre a importância da utilização de materiais reciclados em pavimentos asfálticos. De acordo com um estudo realizado por Al-Qadi et al. (2016), a conscientização do público é um fator chave para incentivar a adoção de práticas sustentáveis, pois a população precisa entender que a utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos reduz a quantidade dos mesmos em aterros sanitários, além de aumentar a durabilidade do pavimento e reduzir os custos de manutenção.

Outra recomendação é a realização de mais pesquisas e estudos de caso para demonstrar os benefícios e a eficácia da sua utilização. Segundo um estudo realizado por Kim et al. (2019), a falta de informações técnicas sobre a aplicação é um dos principais obstáculos para a adoção dessa prática. Portanto, mais estudos e casos de sucesso podem ajudar a dissipar as dúvidas e incertezas sobre o uso desses materiais.

Além disso, é importante que os governos e as autoridades reguladoras incentivem a utilização, por meio de políticas públicas e incentivos financeiros.

No Brasil, a partir dos anos 2000, começou a ser implementada em importantes rodovias do país, como a Avenida Atlântica (Rio de Janeiro), o Rodoanel em São Paulo, as vias internas da Usina de Itaipu no Paraná, a Avenida Beira-mar Norte (Santa Catarina) e o Boulevard Arruda (Minas Gerais). Alguns exemplos notáveis incluem o Complexo Anchieta- Imigrantes, a BR-277 no sentido Paranaguá, e as PRS 407 e 508 que ligam ao litoral paranaense (BONAFÉ, 2021). A implementação de políticas semelhantes em outros lugares é uma maneira eficaz de incentivar a adoção dessa prática.

Outra recomendação é a criação de parcerias entre empresas, indústrias, universidades e governos para incentivar a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias relacionadas à utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos. De acordo com um estudo realizado por Chang et al. (2020), a colaboração entre diferentes setores é essencial para a inovação e a implementação de práticas sustentáveis.

Por fim, a adoção de práticas sustentáveis como a utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos de tráfego leve deve ser vista como uma oportunidade de negócio para empresas e indústrias. A utilização desses materiais reduz os custos de produção, aumentar a durabilidade do pavimento e melhorar a imagem da empresa em relação à sustentabilidade. Além disso, a utilização de materiais reciclados atende às expectativas dos consumidores que estão cada vez mais preocupados com o meio ambiente.

### **Considerações Finais**

A utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos de tráfego leve apresenta-se como uma alternativa viável e sustentável, que pode trazer benefícios técnicos, ambientais e econômicos. O descarte inadequado de pneus representa um problema global, devido à poluição ambiental causada por esses materiais altamente poluentes. A logística reversa surge como uma estratégia fundamental para garantir o descarte adequado dos pneus sem utilidade, bem como a quantificação do volume de resíduos gerados e o reaproveitamento dos materiais.

A adição de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos pode ser realizada por meio de diferentes métodos, como o processo úmido e o processo seco. Ambos os métodos têm suas vantagens e desafios, sendo necessário considerar as propriedades mecânicas do asfalto, a durabilidade do pavimento e a resistência à deformação. Estudos mostram que a presença de borracha na mistura de asfalto pode melhorar o desempenho dos pavimentos, reduzindo a suscetibilidade à fadiga e melhorando a resistência à deformação sob condições de construção e tráfego.

Além dos benefícios técnicos, a utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos contribui para a redução da quantidade de resíduos gerados, a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>, a redução dos custos de manutenção das estradas e o prolongamento da vida útil dos pavimentos. No entanto, é necessário enfrentar desafios, como a falta de incentivos e políticas públicas que estimulem a reciclagem de pneus, bem como a dificuldade de acesso a pneus descartados em locais remotos.

Em conclusão, a utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos de tráfego leve é uma abordagem promissora que combina benefícios ambientais, técnicos e econômicos. A implementação efetiva dessa prática requer a colaboração entre diferentes atores, incluindo fabricantes, distribuidores, comerciantes e consumidores finais, bem como a adoção de políticas e regulamentações que apoiem a logística reversa e a reciclagem de pneus.

Com essas medidas, é possível promover o desenvolvimento sustentável e contribuir para a preservação do meio ambiente.

### Referências:

- AFLAKI, S.; MEMARZADEH, M. **Using two-way ANOVA and hypothesis test in evaluating crumb rubber modification (CRM) agitation effects on rheological properties of bitumen.** *Constr. Build. Mater.* 2011, 25, 2094–2106.
- AGRAWAL, P. **Effect of Crumb Rubber and Warm Mix Additives on Asphalt Aging, Rheological, and Failure Properties.** Master's Thesis, Queen's University, Kingston, ON, Canada, 2014.
- AHMED R., Alfayez, SAUD A., SULEIMAN, and MONCEF L. Nehdi. **Recycling Tire Rubber in Asphalt Pavements: State of the Art.** *Sustainability* 12, no. 21: 907, 2020.
- AL-HADIDY, A.; YI-QIU, T. **Effect of polyethylene on life of flexible pavements.** *Constr. Build. Mater.* 2009, 23, 1456–1464.
- AL-QADI, I. L., HUANG, H., & WANG, X. **Green roads through recycling of waste tires with asphalt emulsion.** *Construction and Building Materials*, 126, 715-722, 2016.
- ALI, A.H.; MASHAAN, N.S.; KARIM, M.R. **Investigations of Physical and Rheological Properties of Aged Rubberized Bitumen.** *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2013, 2013, 1–7.
- ASTM D6270, **Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications;** **American Society for Testing and Materials**, ASTM International: West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2017.
- BEDUSCHI, Eliane Fátima Strapazzon. **Utilização de pneus inservíveis na composição da massa asfáltica.** Universidade do Oeste de Santa Catarina, Santa Catarina, 2014
- BONAFÉ, Gabriel. **Asfalto-borracha garante vias mais seguras e duráveis.** Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/asfalto-borracha-garante-vias-mais-seguras-e-duraveis/15935>. Acesso em 8 de abril de 2023.
- BONAQUIST, R. **Impact of Mix Design on Asphalt Pavement Durability; Number E-C 186, Enhancing the Durability Asphalt Pavements,** Advanced Asphalt Technologies, LLC, Transportation Research Circular: Washington, DC, USA, 2014.
- CHANG, M.; ZHANG, Y.; PEI, J.; ZHANG, J.; WANG, M.; HA, F. **Low-Temperature Rheological Properties and Microscopic Characterization of Asphalt Rubbers Containing Heterogeneous Crumb Rubbers.** *Materials*, 13, 4120, 2020.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente, **Resolução n° 416**, 30 de setembro de 2009. Ministério do Meio Ambiente, 2009.

CHRISTÓFANI MPH, et al. **Aspectos ambientais sobre pneus inservíveis**. Iniciação - Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística. Novembro: 7(1). 2017.

FERNANDES LSS, et al. **O uso da borracha de pneu na produção de asfalto borracha: uma solução ambiental**. ri.ucsal.br, 2020.

GONÇALVES, PVS et al. **Logística reversa de pneus inservíveis: diagnostico situacional com aplicação de matriz de indicadores de sustentabilidade nos municípios de Belém e Ananindeua, Pará**. Rev. Gestão e Tecnologia. 9(1): 165-181. 2019.

GONG, F.; GUO, S.; CHEN, S.; YOU, Z.; LIU, Y.; DAI, Q. **Strength and durability of dry-processed stone matrix asphalt containing cement pre-coated scrap tire rubber particles**. Constr. Build. Mater. 2019, v. 214, p. 475–483.

GRECA ASFALTOS. **Linha ECOFLEXPAVE. 2009**. Disponível em: [http://www.flexpave.com.br/leiamais\\_ecoflex/13\\_estudo\\_ecoflex\\_2009.pdf](http://www.flexpave.com.br/leiamais_ecoflex/13_estudo_ecoflex_2009.pdf)Acesso em: 10 de abril de 2023.

HINISLIOGLU, S. **Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix**. Mater. Lett. 2004, 58, 267–271.

KIM, H.; LEE, S.; AMIRKHANIAN, S. **Rheology investigation of crumb rubber modified asphalt binders**. KSCE J. Civ. Eng., 14, 839–843,2019.

KHALILI, M.; JADIDI, K.; KARAKOUZIAN, M.; AMIRKHANIAN, S. **Rheological properties of modified crumb rubber asphalt binder and selecting the best modified binder using AHP method**. Case Stud. Constr. Mater. 2019, 11, e00276.

LEITE, P. R, et al. **Logística reversa: Sustentabilidade e Competitividade**. São Paulo: Saraiva, 2017.

LIANG, M.; XIN, X.; FAN, W.; SUN, H.; YAO, Y.; XING, B. **Viscous properties, storage stability and their relationships with microstructure of tire scrap rubber modified asphalt**. Constr. Build. Mater. 2015, 74, 124–131.

LIU, S.; CAO, W.; FANG, J.; SHANG, S. **Variance analysis and performance evaluation of different crumb rubber modified (CRM) asphalt**. Constr. Build. Mater. 2009, 23, 2701–2708.

MASHAAN, N.S.; KARIM, M.R. **Investigating the Rheological Properties of Crumb Rubber Modified Bitumen and its Correlation with Temperature Susceptibility.** Mater. Res. 2012, 16, 116–127.

NOHARA, J. J. et al. **GS-40-Resíduos sólidos: passivo ambiental e reciclagem de pneus.** THESIS, São Paulo, ano 1, v.3, p. 21-57, 2º Semestre, 2005

PNEWS, R. **Associação Brasileira dos Recauchutadores, Reformadores e Remoldadores,** Revista nº 34, 2013-ABR.

PETERSEN, J.C. **Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability: State of the art.** Transp. Res. Rec. 999, 13–30, 1984.

PRESTI, D.L. **Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review.** Constr. Build. Mater. 2013, 49, 863–881.

RODRIGUES, B. S.; PAES, H. V.; SILVA, E. R., da. **Análise do Asfalto Borracha na Pavimentação no Brasil: Uma revisão de literatura.** 2019. Disponível em: <https://dspace.mackenzie.br/bitstream/handle/10899/29291/Barbara%20Sarabia%20Rodrigues%20-%20protegido.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 08 de abril de 2023.

SÃO PAULO. Projeto de Lei Nº 318/2023, de 29 de março de 2023. **Determina a prioridade do uso de asfalto-borracha nas obras de recapeamento e pavimentação asfáltica realizadas através de convênios celebrados entre o Estado e os municípios.** São Paulo, SP: Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo, 2023.

SANTOS, L. A. A.; BOTINHA, R. A.; LEAL, E. A. **A contribuição da logística reversa de pneumáticos para a sustentabilidade ambiental.** RACE: Unoesc, v.12, n.2, p.339-370, jul./dez. 2013.

SANTOS, M.S.F., LIMA, B.B.C. **Cadeia logística reversa de pneus automotivos pós-consumo em Teresina-PI.** Revista S&G.16(1):44-56. 2021.

SEST, SENAT. **Campanha nacional do SEST SENAT faz alerta sobre a importância da reutilização e reciclagem do material.** Disponível em:

<https://www.sestsenat.org.br/noticia/cerca-de-450-mil-toneladas-de-pneus-sao-descartados-por-ano-no-brasil>. Acesso em: 14 de setembro de 2022.

SOARES APF, et al. **Incorporação da borracha para pavimentação asfáltica**. Ciências exatas e tecnológicas, 2016; 3(3): 133-146.

TAKALLOU, M.B.; TAKALLOU, H.B. **Benefits of Recycling Waste Tires in Rubber Asphalt Paving**. Transp. Res. Rec. 1991, Califórnia, p. 87–92.

WANG, H.; LIU, X.; ZHANG, H.; APOSTOLIDIS, P.; SCARPAS, T.; ERKENS, S. **Asphalt-rubber interaction and performance evaluation of rubberised asphalt binders containing non-foaming warm-mix additives**. Road Mater. Pavement Des. 2020, 21, 1612–1633.

WANG, Xudong; JIANG, Yi; JIANG, JIARONG et al. **Life cycle assessment of crumb rubber modified asphalt pavement: A case study in China**. Journal of Cleaner Production, v. 255, p. 120296, 2020.

XIE, J.; YANG, Y.; LV, S.; ZHANG, Y.; ZHU, X.; ZHENG, C. **Investigation on Rheological Properties and Storage Stability of Modified Asphalt Based on the Grafting Activation of Crumb Rubber**. Polymers 2019, 11, 1563.