

CENTRO UNIVERSITÁRIO BRASILEIRO - UNIBRA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**JOSÉ MOACIR DA SILVA FILHO
JOÃO VITOR FERNANDES
EMERSON FERNANDO DA SILVA LINS**

**Análise da utilização do asfalto borracha na pavimentação como uma solução
técnica e sustentável: uma revisão de literatura.**

RECIFE
2023

**JOSÉ MOACIR DA SILVA FILHO
JOÃO VITOR FERNANDES
EMERSON FERNANDO DA SILVA LINS**

Análise da utilização do asfalto borracha na pavimentação como uma solução técnica e sustentável: uma revisão de literatura.

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Disciplina TCC do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Centro Universitário Brasileiro -
UNIBRA, como parte dos requisitos para conclusão
do curso.

Orientadora: Profa. Dra. Carolina França

RECIFE
2023

Ficha catalográfica elaborada pela
bibliotecária: Laís Cardoso, CRB-4/PE-1753/P.

S586a Silva Filho, José Moacir de.

Análise da utilização do asfalto borracha na pavimentação como uma solução técnica e sustentável: uma revisão de literatura / José Moacir da Silva Filho, João Vitor Fernandes, Emerson Fernandes da Silva Lins. - Recife: Edição do autor, 2023.
59 p. : il. color.

Orientador(a): Dra. Carolina de Lima França.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro
Universitário Brasileiro – Unibra. Bacharelado em Engenharia Civil,
2023.

Inclui Bibliografia.

1. Asfalto-Borracha. 2. Sustentabilidade. 3. Pavimentação. I.
Fernandes, João Vitor. II. Lins, Emerson Fernandes da Silva. III.
Centro Universitário Brasileiro - Unibra. IV. Título.

CDU: 624

RESUMO

A engenharia civil, desde os primórdios, tem como objetivo primário a construção de estradas, para atender às necessidades fundamentais da sociedade. Com o crescente número de veículos, torna-se imperativo buscar métodos de construção sustentáveis, que possam resistir às demandas do tráfego, minimizando interrupções para manutenção. No Brasil, enfrentamos dois desafios significativos: a deterioração de grande parte das rodovias, e a considerável quantidade de pneus descartados, os quais muitas vezes acabam inutilizados. A partir da aprovação das Resoluções CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 258/99 e nº 416/09, houve avanços notáveis no desenvolvimento de tecnologias, para a reciclagem, de pneus usados e inservíveis. Enquanto o asfalto convencional frequentemente apresenta patologias e deformações, tais problemas são menos prevalentes no asfalto-borracha. O objetivo central deste estudo, é analisar a viabilidade do aproveitamento da borracha, proveniente de pneus inservíveis como material na pavimentação de rodovias, considerando o custo-benefício de sua aplicação, e a redução do descarte inadequado. A metodologia empregada, baseou-se em um estudo descritivo, apoiado na revisão bibliográfica, e no levantamento documental em campo das patologias. A partir dessas análises, foi possível identificar os métodos necessários para a manutenção, em conformidade com as regulamentações do DNIT. A implementação dessa tecnologia, na pavimentação de vias urbanas promete demandar menos intervenções de manutenção, resultando em maior conforto, segurança e economia para os usuários, ao mesmo tempo em que minimiza o uso de recursos públicos. A abordagem representa, assim, um avanço significativo, em direção a um sistema de pavimentação mais sustentável e eficiente.

Palavras-chave: Asfalto-Borracha; Sustentabilidade; Pavimentação.

ABSTRACT

Civil engineering, since its beginnings, has had as its primary objective the construction of roads to meet the fundamental needs of society. With the growing number of vehicles, it is imperative to seek sustainable construction methods that can withstand traffic demands, minimizing interruptions for maintenance. In Brazil, we face two significant challenges: the deterioration of a large part of the highways and the considerable amount of discarded tires, which often end up unusable.

Since the approval of CONAMA Resolutions (National Environmental Council) No. 258/99 and No. 416/09, there have been notable advances in the development of technologies for recycling used and unusable tires. While conventional asphalt often presents pathologies and deformations, such problems are less prevalent in rubber asphalt.

The central objective of this study is to analyze the feasibility of using rubber from scrap tires as a material for road paving, considering the cost-benefit of its application and the reduction of inappropriate disposal. The methodology used was based on a descriptive study, supported by bibliographical review and documentary survey in the field of pathologies. From these analyses, it was possible to identify the methods necessary for maintenance, in accordance with DNIT regulations.

The implementation of this technology in the paving of urban roads promises to require fewer maintenance interventions, resulting in greater comfort, safety and savings for users, while minimizing the use of public resources. The approach thus represents a significant advance towards a more sustainable and efficient paving system.

Keywords: Asphalt-Rubber; Sustainability; Paving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Escarificação do subleito para tratamento e reforço.....	12
Figura 2 - Umidificação do subleito para execução dos serviços.....	13
Figura 3 - Compactação do subleito.....	13
Figura 4 - Camada base e sub-base	14
Figura 5 - Revestimento asfáltico	15
Figura 6 - Revestimento asfáltico	16
Figura 7 - Ação das forças no pavimento Flexível e Pavimento Rígido	16
Figura 8 - Esforços em camadas do pavimento.....	18
Figura 9 - Estrutura pavimento flexível (corte longitudinal)	18
Figura 10 - Desgaste em pavimento.....	24
Figura 11 - Rodovia com danos no acostamento devido a perda de agregados	26
Figura 12 - Exsudação ocorrido em pavimento rodoviário	28
Figura 13 - Fissura por fadiga de grande medida	29
Figura 14 - Trincas em blocos no pavimento	30
Figura 15 - Trinca por reflexão	31
Figura 16 - Níveis de severidade de acordo com profundidade e diâmetro dos buracos	32
Figura 17 - Buraco em pavimento de seriedade média	32
Figura 18 - Gravidade segundo a profundidade das deformações	33
Figura 19 - Deformação plástica no pavimento	33
Figura 20 - Pó de borracha empregada na pavimentação asfáltica.....	34
Figura 21 - Comparação do desenvolvimento de patologias entre o CAP e o pavimento com asfalto borracha	38
Figura 22 - Análise da deformação permanente dos asfaltos modificados	39
Figura 23 - Custos de manutenção por milha de pista (USA \$).....	42
Figura 24 - Afundamento ou deformação permanente	44
Figura 25 - Comparação entre revestimentos asfálticos após experimento com o uso das misturas asfálticas	45
Figura 26 - Ciclo de vida de um pavimento sustentável.....	46
Figura 27 - Ciclo de reaproveitamentos de pneus descartados	48
Figura 28 - Volume de Reciclagem e Asfalto Borracha entre 2019 e 2020.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Terminologia empregadas nas bases.....	17
Tabela 2 - Famílias e tipos de degradações	22
Tabela 3 - Comparação de custos de implementação para 1 km de revestimento do pavimento	41
Tabela 4 - Custos de manutenção de um pavimento flexível convencional em um período de 10 anos.....	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1.	Justificativa.....	10
1.2.	Objetivos	10
2.1.	Pavimentação.....	12
2.2.	Tipos de Pavimento.....	15
2.3.	Revestimento do Pavimento.....	18
2.4.	Principais Normas Regulamentadoras	19
2.5.	Pavimentos asfálticos.....	20
2.6.	Manifestações Patológicas nos Pavimentos	21
2.1.1	<i>Desgaste</i>	23
2.1.2	<i>Desagregação</i>	25
2.1.3	<i>Exsudação</i>	27
2.1.4	<i>Fissuras por fadiga</i>	28
2.1.5	<i>Fissuras em blocos</i>	29
2.1.6	<i>Fissuras por Reflexão</i>	30
2.1.7	<i>Panelas e/ou Buracos</i>	31
2.1.8	<i>Deformação plástica</i>	32
2.7.	Borracha de Pneus Aplicados no Pavimento Flexível	33
3	METODOLOGIA	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1.	Análise de Viabilidade Técnica.....	37
4.2.	Análise dos Custos.....	41
4.3.	Análise Comparativa das propriedades do Asfalto-Borracha	43
4.4.	Sustentabilidade dos Pavimentos Flexíveis com Asfalto-Borracha	46
5	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1 INTRODUÇÃO

A reutilização de pneus descartados emerge como uma resposta crucial para o atual desafio ambiental que enfrentamos. A transformação desses pneus em material asfáltico modificado com borracha destaca-se como uma solução de grande potencial. Estudos indicam que este material apresenta notável durabilidade, menor propensão a deformações permanentes e maior flexibilidade quando comparado ao asfalto convencional (Bernucci, 2014).

A indústria da construção civil no Brasil está em constante evolução, buscando aprimorar a viabilidade econômica e sustentável das obras. A incorporação de materiais ecologicamente corretos nesse setor representa um passo significativo rumo a uma engenharia mais alinhada com as perspectivas globais de preservação ambiental. Nesse contexto, a engenharia sustentável surge como a vanguarda do futuro (Silva et al., 2019).

A indústria da borracha desempenha um papel crucial ao gerenciar a logística reversa dos pneus, destinando adequadamente os materiais considerados inservíveis para a segurança e mobilidade nas vias (Rosa et al., 2018).

O ciclo de vida de um pneu convencional compreende várias etapas, desde a extração das matérias-primas até a gestão dos resíduos gerados. Vale ressaltar que essa configuração pode variar de acordo com as condições locais de produção e venda, resultando em materiais com um tempo de decomposição indefinido (Figueiredo, 2016).

A necessidade de desenvolver tecnologias para a reutilização de pneus usados se faz premente. Dentre as alternativas, destacam-se práticas como a recauchutagem, recapagem, pavimentação com asfalto-borracha, entre outras. Estas não só contribuem para a redução do impacto ambiental, mas também promovem vantagens econômicas e sustentáveis na produção de pavimentos (Silva et al., 2019).

A introdução de materiais reciclados na pavimentação asfáltica representa uma oportunidade para preservar os recursos naturais e minimizar os impactos ambientais associados à extração e transporte de matérias-primas. Essa prática surge como uma opção sustentável, gerando benefícios econômicos e ambientais. Ademais, a

pesquisa continua explorando novos materiais para prolongar a vida útil e reduzir os custos de manutenção dos pavimentos flexíveis (Silva et al., 2019).

Em suma, o presente trabalho se caracteriza como uma pesquisa documental e bibliográfica, fundamentada na análise qualitativa de informações registradas. O seu propósito é alcançar o objetivo proposto por meio de dados quantificados, contribuindo para a compreensão e avanço das práticas de pavimentação sustentável na engenharia civil.

1.1. Justificativa

No Brasil, aproximadamente 95% das estradas pavimentadas são revestidas com asfalto, um dos materiais de construção mais antigos e versáteis utilizados pela humanidade (Bernucci, 2014). No entanto, em locais com condições de tráfego mais agressivas, os cimentos asfálticos convencionais enfrentam limitações (Leite, 2018). O modal rodoviário é responsável por 58% do transporte de cargas no Brasil, o que eleva as temperaturas nas pistas, resultando em possíveis rupturas prematuras nos revestimentos asfálticos, tanto por fadiga quanto por deformação permanente (Silva et al., 2019). Além disso, uma pesquisa da Confederação Nacional dos Transportes (CNT) em 2015 revelou que 61,8% das rodovias pavimentadas se encontram em estado regular a péssimo (Catapreta et al., 2016).

Ao longo de décadas, diversos pesquisadores têm se dedicado ao desenvolvimento de novas técnicas de modificação do asfalto, com a sustentabilidade como um dos temas mais proeminentes (Rosa et al., 2018). Nesse contexto, surge a proposta de incorporar borracha reciclada de pneus inservíveis como aditivo, visando aprimorar as propriedades do ligante e reduzir o impacto ambiental resultante do descarte inadequado de pneus.

1.2. Objetivos

O presente estudo visa analisar a viabilidade técnica e econômica da implementação do asfalto borracha como material de revestimento em pavimentos flexíveis, em comparação com o método convencional

Para alcançar esse propósito, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Demonstrar o aprimoramento do desempenho técnico dos pavimentos flexíveis ao empregar o asfalto borracha
- b) Caracterizar as ocorrências de manifestações patológicas no pavimento flexível tradicional.
- c) Apresentar a viabilidade econômica da utilização do asfalto borracha como solução para os pavimentos asfálticos.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. Pavimentação

A construção de estradas envolve a criação de uma estrutura complexa conhecida como pavimento. Esta estrutura é composta por diversas camadas, construídas sobre uma fundação chamada subleito. É comum notar que as camadas mais próximas da superfície apresentam características superiores e demandam investimentos mais elevados (VALENZUELA, 2018).

A superfície da estrada é formada por camadas sobrepostas de materiais específicos, e o comportamento dessas camadas varia de acordo com a origem e as propriedades dos materiais (FIGUEIREDO, 2016). Com o tempo, ocorrem desgastes e degradações desses materiais, o que leva a danos nas rodovias e estradas. Portanto, torna-se crucial a implementação de métodos de conservação e manutenção para prevenir o surgimento de problemas e patologias (LEITE, 2018).

O pavimento, constituído por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados, tem como objetivo atender às necessidades estruturais e operacionais do tráfego, de forma durável e econômica. Em termos estruturais, é projetado para distribuir os esforços e aliviar a pressão sobre as camadas inferiores, que são menos robustas (LEITE, 2018).

A camada de reforço do subleito, composta por solo argiloso, possui qualidade superior à camada de subleito. Ela desempenha um papel essencial ao aliviar os esforços exercidos sobre essa camada devido à sua profundidade (ABNT, 2014). A execução dessa camada é detalhada nas Figura 1 e Figura 2.

Figura 1 - Escarificação do subleito para tratamento e reforço



Fonte: EMCONBRAS, 2014

Figura 2 - Umidificação do subleito para execução dos serviços



Fonte: EMCONBRAS, 2014

O subleito desempenha um papel fundamental na construção e sustentação do pavimento, sendo o terreno sobre o qual toda a estrutura é elaborada e apoiada. Para garantir sua eficácia, é crucial conduzir uma série de estudos, com foco especial na profundidade, uma vez que esta é significativamente influenciada pelas cargas exercidas pelo tráfego (ABNT, 2014).

Esta camada é composta por materiais consolidados e compactados de forma natural, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Compactação do subleito



Fonte: EMCONBRAS, 2014

A construção das bases e sub-bases surge da necessidade de mitigar as pressões que afetam as camadas inferiores de solo. A camada de base desempenha o papel crucial de distribuir os esforços sobre as camadas inferiores, sendo comumente projetada com espessura considerável. Uma alternativa economicamente

vantajosa é a divisão dessa camada em duas, formando assim a camada de base e a camada de sub-base (ABNT, 2014).

A Figura 4 oferece uma representação desse contexto.

Figura 4 - Camada base e sub-base



Fonte: Jornal O Líder, 2016

As camadas de base e sub-base desempenham um papel fundamental na drenagem sub-superficial dos pavimentos, representando um aliado essencial nesse aspecto. A construção dessas camadas pode ser realizada de forma natural, utilizando solo estabilizado, ou por meio da combinação de solos com materiais mais agregados, como brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado com ligante hidráulico ou asfáltico, e até mesmo concretos, entre outros materiais (MEDINA, 2018).

Já o revestimento, é a camada que suporta as cargas, sejam elas estáticas ou dinâmicas, sem sofrer deformações excessivas, sejam elas elásticas, plásticas, desagregação de componentes ou perda de compactação. No momento de sua elaboração, é crucial que seja composto por materiais altamente aglutinados, a fim de evitar qualquer deslocamento horizontal. Dentre os materiais que compõem essa camada estão blocos pré-moldados de concreto, placas de concreto, concreto compactado e pedras cortadas justapostas (ABNT, 2014). Seu processo de execução está ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Revestimento asfáltico



Fonte: Transporta brasil, 2018

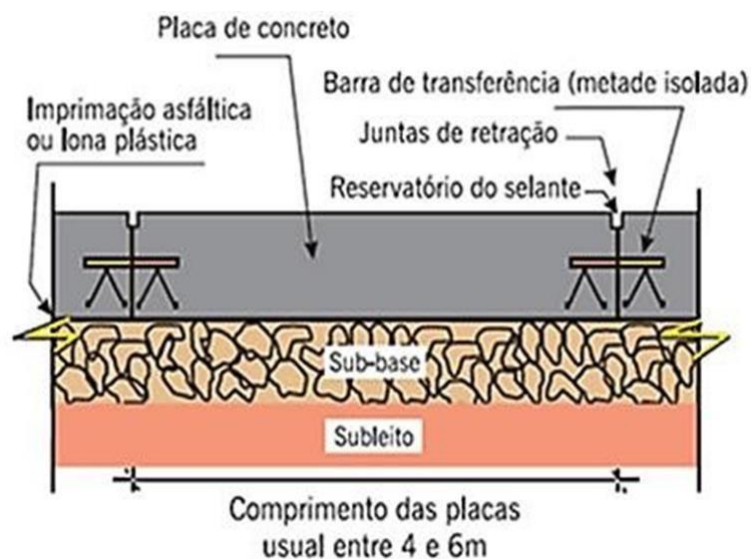
As diversas camadas que compõem um pavimento desempenham funções distintas, todas elas voltadas para garantir condições ideais de suporte ao rolamento, independentemente das condições climáticas. É essencial que o pavimento ofereça segurança ao usuário em todas as situações de uso (MARQUES, 2018).

2.2. Tipos de Pavimento

Os pavimentos são classificados segundo suas estruturas, conforme descrito por Ruth et al. (2007), em três categorias distintas: pavimentos rígidos, pavimentos semirrígidos (também conhecidos como semiflexíveis) e pavimentos flexíveis.

Os pavimentos rígidos, de acordo com a definição de Rene (2016), são aqueles que apresentam poucas deformações e são principalmente compostos por concreto de cimento. É importante ressaltar que, nos pavimentos rígidos, a camada de rolamento desempenha simultaneamente a função de estrutura, redistribuindo os esforços e reduzindo a tensão imposta à fundação.

Figura 6 - Revestimento asfáltico

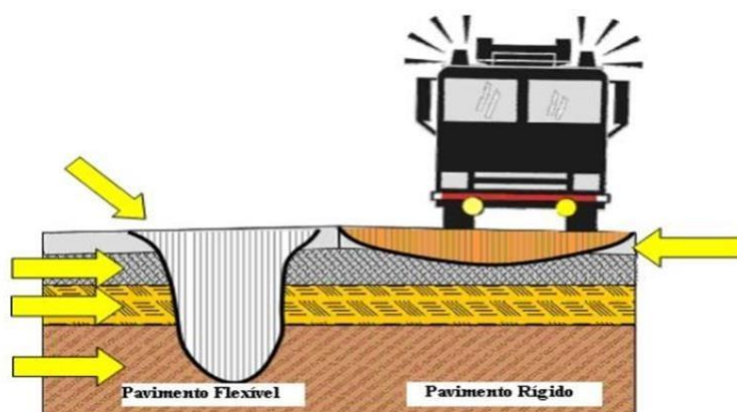


Fonte: MEDINA, 2018

De acordo com Senço (2007), os pavimentos flexíveis são caracterizados por suportar deformações sem levar ao rompimento, dentro de um limite determinado.

Rene (2016) destaca uma das diferenças fundamentais entre as tecnologias de pavimentação: a maneira como as cargas são distribuídas no terreno. Enquanto os pavimentos flexíveis tendem a transmitir as cargas verticalmente, concentrando-as em um único ponto, as placas de concreto atuam de forma semelhante a uma ponte sobre o subleito. Isso resulta em uma distribuição de cargas sobre uma área maior do solo, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Ação das forças no pavimento Flexível e Pavimento Rígido



Fonte: RENE, 2016

Conforme destacado, os revestimentos compreendem dois tipos distintos de bases, cada uma apresentando condições específicas, como evidenciado na Tabela 1.

Tabela 1 - Terminologia empregadas nas bases

BASES	RÍGIDAS	Concreto de cimento; Macadame de cimento; Solo-cimento.	
	FLEXÍVEIS	Solo estabilizado	Granulometricamente; Solo-betume Solo-cal; Solo-brita.
		Macadame hidráulico; Brita graduada com ou sem cimento; Macadame betuminoso.	
		Alvenaria poliédrica	Por aproveitamento
		Paralelepípedos	

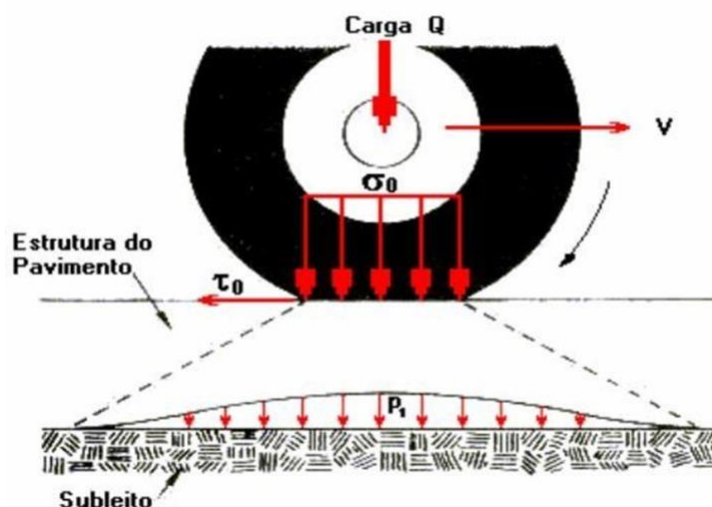
Fonte: SENÇO, 2007

O processo de pavimentação de uma via destinada à circulação de veículos, como observado por Tavares (2013), representa uma intervenção na engenharia civil voltada, em primeiro plano, para a otimização da operação do tráfego rodoviário.

Balbo (2017) ressalta que a estrutura do pavimento é concebida, em um contexto estritamente estrutural, para receber e distribuir esforços, visando a aliviar pressões sobre as camadas inferiores, que geralmente apresentam menor resistência, embora essa não seja uma regra universalmente aplicável.

Nesse sentido, é crucial que todas as peças que compõem o pavimento operem dentro de deformações compatíveis com sua natureza e capacidade de suporte. Isso implica em evitar processos de ruptura ou danificação prematura e inadvertida nos materiais que constituem as camadas do pavimento, conforme ilustrado na Figura 8 (Balbo, 2017).

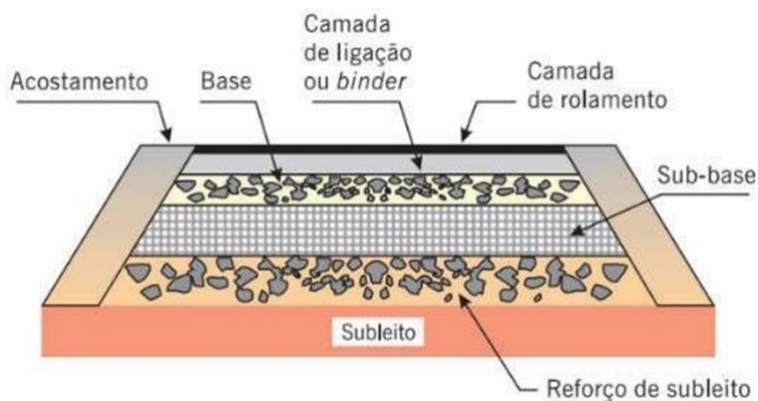
Figura 8 - Esforços em camadas do pavimento



Fonte: BALBO, 2017

Segundo Tavares (2013), os pavimentos flexíveis referem-se aos pavimentos asfálticos, compostos por uma camada superficial asfáltica (revestimento) sustentada sobre camadas inferiores, que são essencialmente constituídas por materiais granulares, solos ou agentes cimentantes. A estrutura desse pavimento pode ser visualizada na Figura 9.

Figura 9 - Estrutura pavimento flexível (corte longitudinal)



Fonte: MEDINA, 2018

2.3. Revestimento do Pavimento

Conforme Balbo (2017), o revestimento desempenha diversas funções, incluindo a capacidade de suportar cargas estáticas ou dinâmicas sem sofrer grandes deformações, desagregação de componentes ou perda de compactação. Para isso, é essencial que seja composto por materiais bem aglutinados ou dispostos de maneira a evitar movimentações horizontais.

Outros materiais que também proporcionam essas condições são destacados por Balbo (2017), como pedras cortadas justapostas, paralelepípedos, blocos pré-moldados de concreto, concreto de cimento Portland, concreto compactado com rolo, tratamentos superficiais betuminosos e diversas misturas betuminosas.

Ao analisar o subleito, percebe-se que as cargas aplicadas em sua superfície são aliviadas em profundidade, como ressalta Hanson et al. (2018). Portanto, é crucial dar uma atenção especial aos seus estratos superiores, onde os esforços solicitantes são mais intensos. Nesse sentido, Tavares (2013) ressalta a importância de que a camada de subleito seja composta por um material natural compactado.

Considerando que o subleito compõe as camadas intermediárias dos pavimentos, Senço (2007) enfatiza que é possível encontrar subleitos com resistência limitada aos esforços verticais que atuam em sua superfície. Balbo (2017) corrobora essa ideia, destacando a necessidade, em alguns casos, de aplicar uma camada de solo de melhor qualidade sobre o subleito, atuando como um reforço e garantindo que a fundação receba esforços de menor magnitude, compatíveis com sua resistência.

Ruth et al. (2007) observam que, embora não seja uma obrigação, é frequente optar por essa prática por motivos econômicos, visto que subleitos com baixa resistência demandam camadas de base e sub-base mais espessas do ponto de vista do projeto. Essa estratégia, segundo Balbo (2017), permite que o reforço do subleito suporte solicitações de maior magnitude, assumindo parcialmente as funções do subleito.

Faxina (2017) complementa, definindo o subleito como a estrutura sobre a qual o pavimento é suportado, e ressalta a importância de analisar a fundo as profundidades em que os esforços dos veículos atuam, usualmente variando de 60 a 150 centímetros de profundidade.

2.4. Principais Normas Regulamentadoras

Conforme a NBR 15166, o uso de asfalto modificado tem como finalidade melhorar as propriedades químicas e físicas do revestimento do pavimento, resultando em uma maior durabilidade. É relevante notar que essa técnica pode ser aplicada tanto a quente quanto a frio, o que representa uma vantagem adicional para os usuários (ABNT, 2014).

De acordo com a caracterização da NBR 9574, a utilização de emulsões asfálticas em conjunto com o Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) tem como propósito proporcionar uma aderência eficaz e conferir impermeabilização ao concreto asfáltico (ABNT, 2014).

A norma NBR 15529 esclarece que a mistura asfáltica modificada com borracha proveniente de pneus é uma forma sustentável de dar destino aos pneus inutilizados (ABNT, 2007).

No que se refere ao procedimento do CBUQ, a NBR 12949 destaca que o processo é realizado em usinas, onde os agregados são aquecidos e misturados.

Posteriormente, a mistura é transportada diretamente do misturador para os caminhões basculantes, que a levam para o local destinado à aplicação (ABNT, 2016).

A NBR 12265 aborda a camada do pavimento cujo propósito é oferecer resistência às cargas verticais provenientes dos veículos, distribuindo-as de maneira adequada para a camada subjacente (ABNT, 2014).

A interconexão entre as normas NBR 12265, 9574 e 15529 se dá durante o processo de implementação do revestimento asfáltico. Uma sub-base ou base devidamente processada fornecerá o suporte necessário para a subsequente execução da impermeabilização, visando assegurar uma aderência efetiva.

2.5. Pavimentos asfálticos

A história dos pavimentos remonta a séculos atrás, e o asfalto se destaca como um dos materiais mais antigos empregados nessa construção. Sua utilização teve início na França em 1802, seguida pelos Estados Unidos em 1838 e pela Inglaterra em 1869. A produção desse aglutinante, derivado do petróleo, só teve início em 1909 (MARQUES, 2018).

Leite (2018) oferece a definição precisa do asfalto como um material de consistência variável, com coloração que varia entre o pardo e o preto. Sua composição é essencialmente de betume, sendo proveniente de jazidas naturais ou obtido por meio do refino do petróleo.

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é um aglutinante que apresenta propriedades termoplásticas, permitindo sua aplicação a altas temperaturas. Além disso, é impermeável à água, o que previne a penetração da mesma na estrutura do pavimento, evitando futuros problemas. Possui características viscoelásticas,

combinando comportamento elástico com viscoso quando submetido a cargas. É pouco reativo, oxidando-se lentamente com a exposição ao ar, embora tal processo possa ser acelerado com o aumento da temperatura (LEITE, 2018).

Mourão (2013) estabelece especificações que classificam os Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) com base na propriedade de penetração, determinando os tipos disponíveis, tais como: CAP 30/45; CAP 50/70; CAP 85/100; e CAP 150/200.

Segundo Faxina (2017), a aplicação dos CAP depende da relação entre viscosidade e temperatura, sendo definida em consonância com a estrutura do pavimento em questão. Cada tipo de mistura possui aplicações pré-determinadas: o CAP 30/45, 50/70 e 85/100 são empregados em pré-misturas de areia-asfalto e concreto asfáltico, enquanto o CAP 150/200 é reservado para tratamentos do revestimento do pavimento e macadame betuminoso.

As emulsões asfálticas são produtos resultantes da dispersão de um material asfáltico em um meio aquoso, ou vice-versa, como na mistura de CAP com água e um agente emulsivo. Geralmente, a proporção de CAP utilizada na emulsão varia de 60 a 70%, enquanto o agente emulsivo varia de 0,2 a 1%. Os agentes emulsivos comumente empregados incluem Sal de Amina, Silicatos Solúveis ou não Solúveis, Sabões e Óleos Vegetais Sulfonados, além de Argila Coloidal (FAXINA, 2017).

Os asfaltos modificados têm como propósito aprimorar suas propriedades, conferindo-lhes características associadas aos aditivos incorporados. Essa modificação visa melhorar propriedades mecânicas, conferir elasticidade, entre outros benefícios (LEITE, 2018)

2.6. Manifestações Patológicas nos Pavimentos

A patologia, conforme definida por Azevedo (2016), encontra seu campo de aplicação mais comum na medicina, onde é entendida como a disciplina que se dedica ao estudo e diagnóstico das doenças, investigando suas origens, sintomas, agentes causadores e os mecanismos de ocorrência.

No contexto da engenharia, o termo "patologia" guarda grande semelhança com o seu uso na medicina. Refere-se, de modo geral, ao estudo das origens, manifestações, consequências e mecanismos de ocorrência de falhas e sistemas de degradação das estruturas (Azevedo, 2016).

Quando se trata das patologias específicas dos pavimentos flexíveis, Branco e Pereira (2016) destacam a existência de uma diversidade de problemas, os quais podem ser agrupados em diferentes categorias, tais como:

- a) Deformações;
- b) Fendilhamento;
- c) Desagregação da camada de desgaste;
- d) Movimento de materiais.

Essas patologias podem ser classificadas em famílias, e dentro de cada uma delas, existem vários tipos distintos de degradações. A Tabela 2, conforme apresentada, oferece uma análise detalhada dessa classificação.

Tabela 2 - Famílias e tipos de degradações

Famílias de degradações	Tipos de degradações		
Deformações	Fissuração	Longitudinal	Eixo
		Transversal	
	Deformações localizadas		
	Trincas		
	Plástica	- Grande raio (camadas inferiores) - Pequeno raio (camadas superiores)	
Fendilhamento	Fendas	- Fadiga	
		-Longitudinais	- Eixo
		- Transversais	
		- Parabólicas	

Famílias de degradações	Tipos de degradações	
	Panela/Buraco	- Malha fina - Malha grossa
Desagregação da camada de desgaste	Desagregação superficial Buracos	
Movimento de materiais	Exsudação	

Fonte: BRANCO; PEREIRA, 2016

Conforme destacado pelo DNIT (2016), até mesmo os reparos realizados na camada de desgaste são considerados patologias, uma vez que podem resultar em rupturas no adesivo e criar áreas propensas ao surgimento de novas degradações e patologias.

Em situações em que ocorrem patologias em rodovias e estradas, torna-se crucial identificar e analisar as razões subjacentes a essas ocorrências. Isso é essencial para planejar uma manutenção mais eficaz, visando evitar a repetição dos problemas, ou ao menos adiar novas manifestações (FIGUEIREDO, 2016).

Uma vez identificado o tipo de patologia e suas causas, o procedimento a ser adotado envolve a aplicação de métodos de preservação e manutenção que assegurem a integridade do pavimento em termos de segurança, conforto e economia. Com essa abordagem, é possível estudar e analisar uma variedade de danos e patologias que são comumente observados nos pavimentos brasileiros.

2.1.1 Desgaste

O desgaste por polimento, conforme destacado por Barca e Nogueira (2015), é resultado das cargas de tráfego repetidas que levam à polidez do agregado e à consequente diminuição da aderência do pneu ao pavimento. Esse tipo de dano não reduz substancialmente a velocidade do veículo, sendo detectado por meio de dados de teste de resistência que se apresentam baixos ou consideravelmente reduzidos após avaliação anterior.

Figueiredo (2016) classifica no grupo de desgaste as seguintes patologias:

a) Rachaduras causadas pela fadiga das camadas ligadas devido ao movimento e endurecimento;

b) Fissuras longitudinais que podem ocorrer no eixo ou no ressalto, possivelmente devido ao baixo acabamento superficial da camada superior ou à difusão do sulco longitudinal da camada de base. Um sulco que se estende sobre o eixo pode ocorrer devido a ações de movimento, causando fadiga devido à flacidez, por exemplo, no caso de expansão;

c) Fissuras transversais, que podem ocorrer devido à retração térmica da camada de desgaste e são comuns no Brasil;

d) Pele de crocodilo, que pode ocorrer em uma rede grande ou restrita. Uma grande rede pode ser causada por espessura insuficiente ou fadiga das camadas devido à falta de poder de pavimentação ou devido à má qualidade de algumas camadas do pavimento. Uma rede fina pode surgir devido à baixa resistência do solo ou ao desenvolvimento de uma grande rede.

Quanto à gravidade, Barca e Nogueira (2015) mencionam que o nível não é determinado, mas o grau de polimento deve ser significativamente alto para ser considerado um defeito na avaliação da condição. A área afetada é medida em metros quadrados. Em relação ao defeito do exsudato, o polimento dos agregados não deve ser considerado.

Figura 10 - Desgaste em pavimento



Fonte: BRASQUIMICAS, 2018

A Figura 10, conforme ilustrada, detalha o desgaste do tipo "pele de crocodilo" ou "jacaré", no qual se verifica a fadiga das camadas de revestimento do pavimento.

Esse fenômeno é causado pela falta de agregamento adequado na pavimentação ou devido à má qualidade de algumas camadas do pavimento

2.1.2 Desagregação

Conforme apontado por Barca e Nogueira (2015), a desagregação se refere à perda da superfície da estrada, resultado da deterioração do aglutinante de asfalto e da liberação de partículas dos agregados soltos. Essa condição evidencia o endurecimento visível do aglutinante ou a má qualidade da mistura. Ademais, tais perdas podem ser ocasionadas por certos tipos de tráfego, como caminhões, que promovem o amolecimento da superfície e a dispersão dos agregados devido a vazamentos de óleo.

De acordo com Figueiredo (2016), este tipo de degradação e patologia se manifesta na superfície das rodovias e estradas. Dentro dessa categoria, as seguintes patologias podem ser consideradas:

1. Desagregação da superfície, ocorre quando o aglutinante e os agregados se separam, muitas vezes devido à ação de água, produtos químicos ou agentes mecânicos. Pode também resultar do endurecimento de ligações, falhas estruturais ou degradação dos agregados;
2. Cabeça do gato, é causada pela rápida perda do ligante, geralmente devido à má qualidade dos materiais e da mistura, levando a uma conexão inadequada dos agregados betuminosos. É comum em locais com tráfego intenso, sujeito a elevadas forças tangenciais;
3. Descamação, frequentemente originada pela má adesão da camada de desgaste à camada subjacente ou pela aplicação de uma camada muito fina inicial;
4. Ninhos, que se desenvolvem a partir de outras patologias que resultam em desagregação e exposição de materiais, muitas vezes devido a falhas localizadas;
5. Diluição, que ocorre quando a água penetra em fissuras no solo, podendo ser transportada pela passagem de veículos, arrastando partículas das camadas subjacentes;
6. Desintegração dos agregados, muitas vezes devido a problemas relacionados ao ligante, como falta de adesão entre agregados e ligante, endurecimento ou dosagem inadequada. Pode também ocorrer se houver abertura prematura durante o tratamento superficial;

7. Polimento dos agregados, resultando na perda da microestrutura da superfície da estrada, reduzindo o atrito com os pneus e diminuindo a segurança dos usuários. A baixa resistência ao polimento dos agregados, combinada com o tráfego, é a principal causa desse tipo de patologia.

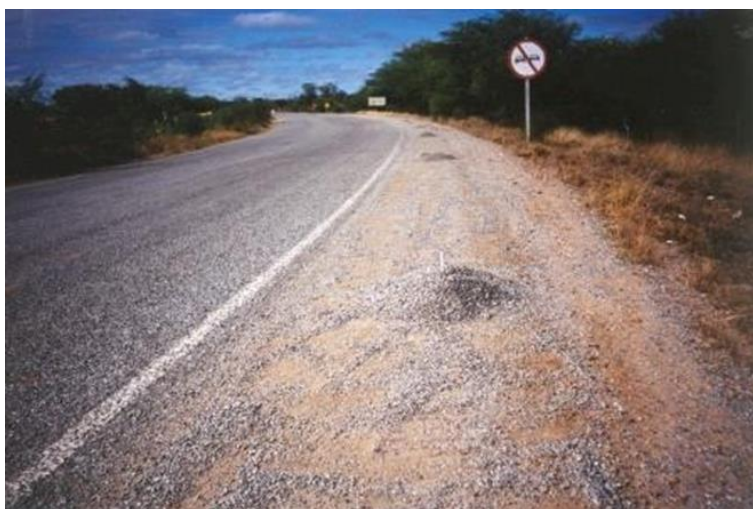
Essas situações podem ser classificadas em três níveis de gravidade, conforme Barca e Nogueira (2015)

A estrada começa a perder agregados ou aglutinantes. Em alguns locais, a superfície começa a aprofundar-se.

O Pavimento já perdeu alguns constituintes ou pastas. A textura da estrada é moderadamente grossa e com pequenos orifícios.

Perda significativa de agregado ou pastas. A textura da estrada é muito grossa e muito vazia. As áreas dos furos têm um diâmetro inferior a 10,0 mm e uma profundidade inferior a 13,0 mm.

Figura 11 - Rodovia com danos no acostamento devido a perda de agregados



Fonte: BRASQUIMICAS, 2018

Como demonstrado na Figura 11, o acostamento exibe claramente um exemplo de desagregação, em que ocorre a separação dos agregados do revestimento do pavimento, resultando em uma aparência saliente de areia. Esse fenômeno é caracterizado pela perda do aglutinante de asfalto e a soltura de partículas dos agregados, indicando um endurecimento visível do aglutinante ou a presença de uma mistura de baixa qualidade. Além disso, a desagregação pode ser agravada por fatores como a ação de água, produtos químicos ou agentes mecânicos, bem como por derramamentos de óleo, principalmente provenientes de veículos pesados, como caminhões.

2.1.3 Exsudação

Conforme definido pelo DNIT 005 (2018), a exsudação de um pavimento ocorre quando há um excesso de ligante betuminoso na superfície, resultante da migração do ligante através do revestimento. Segundo Souza (2015), isso se manifesta como um filme de asfalto na superfície da estrada, criando uma aparência brilhante, transparente e reflexiva, que geralmente apresenta uma sensação pegajosa. Esse efeito é provocado pelo excesso de aglutinante ou pela escassez de poros no ar presente na mistura.

Essa situação se verifica quando o asfalto penetra nos espaços vazios da mistura durante a aplicação em altas temperaturas do solo e, posteriormente, se expande na superfície da estrada. Devido à irreversibilidade desse processo em climas mais frios, o asfalto tende a acumular-se na própria superfície (DNIT 005, 2018).

Figueiredo (2016) destaca que a exsudação ocorre em condições de excesso de ligante e aglutinante, resultando em uma migração do betume para a superfície. Isso leva a uma alteração na estrutura da superfície da estrada.

A classificação da exsudação de acordo com seu grau de ocorrência é detalhada por Barca e Nogueira (2015), e pode ser descrita da seguinte forma:

- a) Exsudação mínima, ocorrendo apenas alguns dias por ano, sem aderência do pavimento a calçados ou veículos.
- b) Exsudação moderada, em que o asfalto adere a calçados e veículos por várias semanas ao longo do ano.
- c) Exsudação significativa, com o asfalto aderindo a calçados e veículos por algumas semanas anualmente (BARCA; NOGUEIRA, 2015).

Figura 12 - Exsudação ocorrido em pavimento rodoviário



Fonte: BRASQUIMICAS, 2018

Conforme ilustrado na Figura 12, a exsudação é visualmente perceptível pela diferença de tonalidade no revestimento da estrada, indicando a presença excessiva de aglutinante.

2.1.4 Fissuras por fadiga

As fissuras por fadiga, também conhecidas como fissuras por desgaste, se assemelham a rachaduras em forma de blocos que lembram a aparência de jacarés. Elas se formam devido à exposição repetida a cargas que aumentam a pressão sobre o movimento do pavimento (DOMINGUES, 2016). Inicialmente, essas trincas surgem na base do pavimento e, à medida que as rodas dos veículos passam, são submetidas a maiores tensões e deformações. Inicialmente, elas se expandem em uma série de fissuras longitudinais paralelas à superfície. Com o tempo e os movimentos repetidos, essas rachaduras se unem, formando padrões poligonais angulosos que se assemelham à pele de crocodilo. Em geral, essas fissuras não excedem 0,60 metros (SOUZA, 2015).

Conforme Barca e Nogueira (2015), a fadiga geralmente ocorre em áreas sujeitas a tráfego repetitivo, especialmente em pistas marcadas. Isso significa que não ocorrerá em toda a região, a menos que o pavimento inteiro esteja sujeito a cargas repetitivas. As fissuras que se desenvolvem em uma área não submetida a cargas repetitivas são chamadas de blocos, e sua origem não está relacionada ao efeito de repetição. Essa falha é considerada um dano estrutural significativo, muitas vezes acompanhado de uma deformação plástica na estrutura do pavimento.

A gravidade desses danos pode ser classificada como (BARCA; NOGUEIRA, 2015):

a) Fendas capilares e fissuras longitudinais de pequena dimensão que podem ser paralelas ou não e não estão interligadas umas às outras. Elas não demonstram a quebra do material ao longo das bordas.

b) Desenvolvimento de trincas no plano L (fissura que ocorre perpendicular e paralelamente ao pavimento) na forma de um padrão ou rede que pode ser facilmente destacado.

c) Uma rede ou padrão que se desenvolveu de forma a criar peças claramente definidas. Algumas partes podem se mover com a passagem de veículos.

A medição dos danos é feita em metros quadrados da área afetada. Uma complexidade adicional é que, muitas vezes, existem dois ou três níveis de gravidade na mesma área. Se essas partes puderem ser facilmente distinguíveis, devem ser consideradas separadamente. Além disso, toda a área deve ser avaliada no nível de gravidade mais elevado.

Figura 13 - Fissura por fadiga de grande medida



Fonte: VALENZUELA, 2018

2.1.5 Fissuras em blocos

Segundo Souza (2015), as fissuras em blocos caracterizam-se por serem fissuras interconectadas que subdividem a estrada em partes retangulares, com dimensões que variam de 0,30 m a 3,0 m de largura e 0,3 m a 3,0 m de comprimento. Este fenômeno é mais comumente observado em pavimentos de concreto e asfálticos, resultando das variações diárias de temperatura.

Diferentemente das fissuras por fadiga, que são pequenas e apresentam ângulos mais agudos, como aponta Domingues (2016), as fissuras em blocos não estão relacionadas ao estresse e carga, mas sim à rigidez excessiva do asfalto. Elas tendem a ocorrer em uma parte significativa do pavimento, em contraste com as

fissuras por fadiga, que se formam apenas em áreas submetidas a cargas repetitivas de veículos.

Barca e Nogueira (2015) estabelecem um sistema de classificação para a gravidade das fissuras em blocos:

- a) Blocos caracterizados por fissuras de baixa gravidade.
- b) Blocos determinados por fendas de gravidade média.
- c) Blocos originados por trincas de alta severidade.

As medições das fissuras são expressas em metros quadrados da área afetada. Conforme a prática, cada nível de gravidade diferente deve ser quantificado e registrado de forma separada para cada seção da estrada.

Figura 14 - Trincas em blocos no pavimento



Fonte: VALENZUELA, 2018

2.1.6 Fissuras por Reflexão

Conforme Domingues (2016), é importante ressaltar que esse tipo de dano é exclusivo de estradas de asfalto construídas sobre uma base de laje de cimento Portland, não sendo observado em pavimentos com outros tipos de substratos, como os estabilizados com cimento ou cal. Essas fissuras têm sua origem na própria laje de cimento Portland, causada por variações de temperatura ou umidade, refletindo-se na superfície do pavimento asfáltico. Cabe salientar que essa patologia não está diretamente relacionada às cargas, embora o tráfego sobre essas estradas possa resultar no rasgamento do asfalto nas proximidades das fissuras. O conhecimento das

dimensões da laje sob a superfície do cimento asfáltico é fundamental para a compreensão e gestão desses danos.

Barca e Nogueira (2015) estabelecem critérios de classificação para a gravidade das fissuras nesse contexto:

a) Baixa gravidade, caracterizada por:

Fissuras sem preenchimento menor que 10,0 mm;

Fissuras totais em cada largura.

b) Gravidade média, compreendendo:

Fissuras com largura entre 10,0 e 76,0 mm;

Rachaduras de até 76,0 mm de largura, cercadas por fissuras irregulares;

Qualquer rachadura de qualquer largura cercada por fendas irregulares.

c) Alta gravidade, incluindo:

Qualquer rachadura ou fissura cercada por rachaduras irregulares de gravidade média ou alta;

Fissuras não preenchidas com mais de 76,0 mm de largura;

Uma rachadura de qualquer largura em uma estrada severamente fraturada.

Figura 15 - Trinca por reflexão



Fonte: BRASQUIMICAS, 2018

2.1.7 Painelas e/ou Buracos

Valenzuela (2018) define sulcos como pequenas deformações na superfície da estrada, caracterizadas geralmente por terem um diâmetro inferior a 0,90 m,

adquirindo o formato semelhante a uma taça. Comumente, apresentam bordas acentuadas e laterais verticais próximas à superfície. O aumento dos vazios ocorre devido ao acúmulo de água. Essa deterioração na estrada pode ser exacerbada pela presença de misturas fracas ou uma base subjacente frágil, bem como por condições de rachaduras por fadiga de alta severidade.

É importante ressaltar que os buracos, frequentemente, estão associados a danos na estrutura da estrada e não devem ser confundidos com desagregação ou desgaste. Caso os sulcos se formem devido a trincas de desgaste acentuado, é recomendado classificá-los como panelas ao invés de desgaste (Valenzuela, 2018).

O nível de gravidade pode ser definido como (BARCA; NOGUEIRA, 2015):

Figura 16 - Níveis de severidade de acordo com profundidade e diâmetro dos buracos

Profundidade máxima	Diâmetro médio		
	102 a 203 mm	203 a 457 mm	457 a 762 mm
12,7 a 25,4 mm	Severidade Baixa	Severidade Baixa	Severidade Média
> 25,4 a 50,8 mm	Severidade Baixa	Severidade Média	Severidade Alta
> 59,8 mm	Severidade Média	Severidade Média	Severidade Alta

Fonte: VALENZUELA, 2018

A identificação de buracos em pavimentos é realizada por meio da classificação em unidades de baixa, média e alta profundidade, sendo essencial analisar cada categoria de forma distinta.

Figura 17 - Buraco em pavimento de seriedade média



Fonte: BRASQUIMICAS, 2018

2.1.8 Deformação plástica

A deformação plástica, caracterizada pela formação de sulcos na superfície da estrada devido à influência dos pneus, é descrita por Domingues (2016). Em alguns casos, pode ocorrer um levantamento do pavimento em relação às partes laterais da depressão, mas geralmente essa ocorrência só se torna visível após a chuva, quando as faixas estão com água. Esse fenômeno pode resultar da imersão em uma das

camadas do pavimento, frequentemente causada por compactação ou movimentação lateral dos agregados devido ao estresse. Em casos de severidade extrema, esse colapso pode levar a imperfeições estruturais na superfície da estrada.

O grau de gravidade dessas deformações pode ser classificado da seguinte forma, conforme Barca e Nogueira (2015):

Figura 18 - Gravidade segundo a profundidade das deformações

Profundidade Média (mm)	Severidade
6,0 a 13,0	Baixa
13,0 a 25,0	Média
Maior que 25,0	Alta

Fonte: BARCA; NOGUEIRA, 2015

A mensuração da deformação é feita em metros quadrados da área afetada, e a espessura é determinada pela média da profundidade dos sulcos. A profundidade média é obtida ao posicionar uma régua perpendicular à direção do sulco e realizar a medição da profundidade.

Figura 19 - Deformação plástica no pavimento



Fonte: BRASQUIMICAS, 2018

2.7. Borracha de Pneus Aplicados no Pavimento Flexível

A técnica que utiliza pó de borracha proveniente da trituração de resíduos pneumáticos, representando cerca de 20% do material na mistura asfáltica para

pavimentação ou recapeamento de vias, é conhecida como pavimentação com borracha reciclada (Nome, Ano). Geralmente, estimam-se que sejam necessários mil pneus para pavimentar mil metros, sendo esse comprimento variável de acordo com as especificações da via, como a espessura e largura da camada asfáltica (MATTIOLI et al, 2019). A Figura 20 oferece um exemplo de pó de borracha utilizado nesse processo de pavimentação asfáltica.

Figura 20 - Pó de borracha empregada na pavimentação asfáltica



Fonte: DA SILVA; OKAMOTO, 2019

A tecnologia de reaproveitamento de materiais, que inclui o uso de pó de borracha proveniente da trituração de pneus, oferece benefícios significativos tanto para o meio ambiente quanto para a durabilidade do pavimento. Isso resulta na redução de reflexões de trincas em reforços, menor geração de ruídos e uma melhoria na resistência à fadiga das camadas de revestimento, além de uma diminuição nos custos de manutenção (MELLONE, et al., 2013).

O material proveniente da trituração dos pneus pode ser incorporado ao aglutinante asfáltico de duas maneiras distintas: por meio da técnica de incorporação a seco, onde a borracha é misturada aos agregados antes da adição do ligante asfáltico; e por meio da técnica úmida, onde a borracha triturada é adicionada ao aglutinante asfáltico em uma dosagem que varia de 5% a 25% do material asfáltico. Em ambas as abordagens, um planejamento cuidadoso, com especial atenção à usinagem e compactação, é essencial para a execução adequada do revestimento (RUTH, JONSSON e SETZE, 2007).

Contudo, é importante destacar, conforme apontado por Tavares (2013), que uma dosagem inadequada pode levar a problemas, como exsudação e trincas por contração térmica, que estão diretamente ligados à proporção incorreta dos materiais.

Estudos demonstram que o selante com asfalto-borracha possui uma durabilidade aproximadamente três vezes maior em comparação com selantes sem a adição de borracha. Apesar do custo ligeiramente superior para serviços com asfalto-borracha, quando consideramos o custo em conjunto com a vida útil estendida, fica claro que esta opção é mais vantajosa (MATTIOLI et al, 2019).

Além disso, conforme apontado por Mattioli et al (2019), o uso do asfalto-borracha não só prolonga a vida útil do pavimento, mas também reduz os níveis de ruído e reintegra pneus inservíveis à cadeia produtiva. Essa opção de asfalto, com a adição de borracha de pneu, destaca-se pela alta elasticidade, resistência à degradação temporal, coesividade e excelente relação custo/benefício (TAVARES, 2013).

Cappi (2014) ressalta que o aprimoramento das características do ligante resulta em uma melhor distribuição de cargas, graças ao aumento da homogeneização do material. O asfalto-borracha oferece uma série de vantagens, incluindo a redução do envelhecimento, aumento da flexibilidade, elevação do ponto de amolecimento e uma menor susceptibilidade térmica, podendo ser aplicado em diversas situações, como na selagem de trincas e juntas, bem como na produção de Concreto Armado Usinado a Quente.

“Através de pesquisas foi verificado que o quão benéfico é a incorporação de insumos de borracha provenientes da trituração de pneus em ligantes asfálticos, visando uma melhor adaptação às atuais necessidades, tais como: melhor durabilidade, resistência, qualidade superior e redução de gastos financeiros.” (MOTTER, 2013, p. 66).

A aplicação da tecnologia de asfalto-borracha representa uma integração bem-sucedida entre benefícios econômicos, ambientais e sociais, resultando em uma significativa melhoria na qualidade do transporte. Com um pavimento de alta qualidade, os usuários desfrutam de um tráfego mais seguro e confortável, além de experimentarem uma redução nas necessidades de manutenção de seus veículos (MOTTER, 2013).

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa é caracterizada como uma investigação documental e bibliográfica, onde a análise qualitativa dos dados quantificados busca atingir o objetivo proposto. Conforme Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa científica tem o propósito de compreender um ou mais aspectos sobre um tema específico, contribuindo para o avanço do conhecimento humano, e pode assumir diferentes formas para abordar um assunto.

A classificação da pesquisa, conforme Silveira e Gerhardt (2019), leva em conta a abordagem, natureza, objetivo e procedimentos. Quanto à abordagem, esta pesquisa é qualitativa, pois busca objetivar o fenômeno do asfalto borracha como uma alternativa viável para pavimentação flexível.

No que diz respeito à natureza da pesquisa, ela se configura como aplicada, já que gera conhecimentos com aplicação prática na resolução de problemas específicos. Segundo Rodrigues (2007), a pesquisa aplicada é aquela que se destina a investigar, comprovar ou refutar teorias estimuladas.

O objetivo desta pesquisa é descritivo, de acordo com Gil (2017), o que implica analisar propriedades e parâmetros característicos de um conjunto específico que possui aplicação prática.

Quanto aos procedimentos adotados, são de natureza documental e bibliográfica. A pesquisa documental envolve a coleta de dados a partir de documentos ou informações disponíveis, enquanto a pesquisa bibliográfica fundamenta-se em referências teóricas provenientes de publicações diversas (GIL, 2017; SILVEIRA; GERHARDT, 2019).

O levantamento bibliográfico para este estudo foi conduzido em bases de dados renomadas, como a Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP e o Portal de Periódicos CAPES/MEC, utilizando termos e assuntos como Manutenção em Pavimentos, Patologia em Pavimentos, Pavimentos Asfálticos e Asfalto Borracha.

Após a coleta de dados, o material foi avaliado e selecionado para ser utilizado como referencial no desenvolvimento do trabalho, com uma análise criteriosa e categorizada para estabelecer uma conexão coerente com o tema estudado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise de Viabilidade Técnica

Os desgastes nos pavimentos asfálticos têm sido uma preocupação persistente na comunidade científica, pois representam patologias que levam à degradação do asfalto, reduzindo sua vida útil e gerando insatisfação entre os usuários das estradas (Medina, 2018). No Brasil, cerca de 95% dos pavimentos são construídos com a mistura tradicional de asfalto (Leite, 2018). Em locais com condições de tráfego mais agressivas, os cimentos asfálticos convencionais podem ter limitações, e o transporte rodoviário, responsável por 58% do transporte de cargas no país, aumenta a temperatura das pistas, o que pode levar a falhas prematuras nos revestimentos asfálticos, seja por fadiga ou deformação permanente (Silva et al., 2019).

Segundo a Confederação Nacional dos Transportes (CNT), em 2015, 61,8% das rodovias pavimentadas no Brasil foram classificadas como regulares a péssimas em termos de condição geral (CNT, 2015). Além disso, a falta de fiscalização e manutenção contribui para a entrega de pavimentos asfálticos de baixa durabilidade e qualidade, o que representa um risco significativo para a segurança dos usuários (Silva et al., 2019).

Em um estudo conduzido por Santos (2017), foram identificadas duas deformações plásticas, resultantes do excesso de volume de veículos e cargas sobre a rodovia, assim como da má compactação da estrutura. Além disso, uma fissura foi observada, causada por irregularidades na camada subjacente, e uma "panela" surgiu devido à impermeabilização ineficaz. Estes problemas foram identificados em um pavimento com menos de um ano de uso (Santos, 2017).

Outro estudo realizado por Silva et al. (2016) analisou os parâmetros que poderiam reduzir a ocorrência de manifestações patológicas. Os resultados indicaram que pavimentos modificados com materiais apresentaram um menor número de patologias em comparação com os asfaltos produzidos de forma tradicional com cimento asfáltico de petróleo (CAP) (Silva et al., 2016).

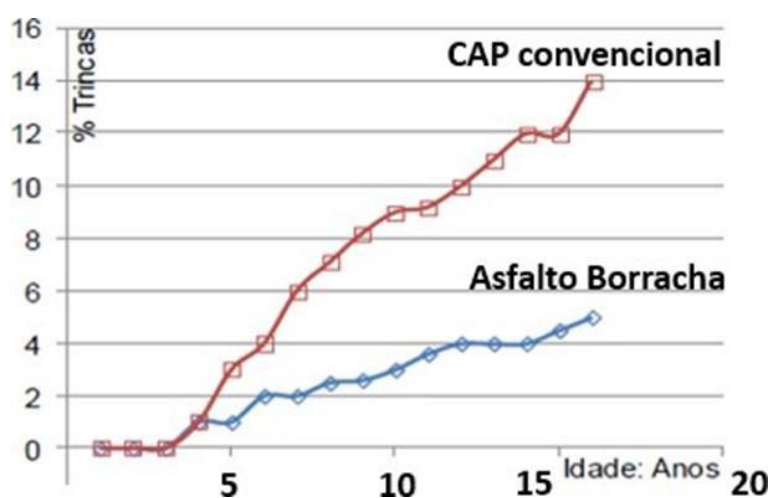
“Uma das soluções para corrigir os problemas relacionados aos revestimentos asfálticos é adicionar elementos ao asfalto para que melhore as características técnicas e consequentemente aumente a vida útil do revestimento. Hoje já são usados e testados diversos agentes que melhoram a resistência e a adesividade do revestimento asfáltico, onde se destacam os

agentes rejuvenescedores, borracha moída de pneu e polímeros (RUTH, 2007, p. 54). ”

O trincamento por fadiga, conforme definido por Sousa et al. (2019), refere-se a um processo de alterações estruturais progressivas, podendo ser localizadas e permanentes. O autor também enfatiza que as tensões e deformações provenientes das trincas, quando repetidas em determinado ponto ou pontos, podem levar à completa ruptura após um determinado número de repetições (Sousa et al., 2019, p.19).

Para aumentar a resistência ao trincamento por fadiga, Sousa et al. (2019) conduziram um estudo no qual observaram que o asfalto tradicional, quando modificado com a adição de 20% de borracha, apresenta um aumento de resistência em até 10 vezes em comparação com o asfalto sem essa adição. A Figura 21 ilustra a área trincada em pavimentos construídos com asfalto borracha em comparação com aqueles utilizando ligante asfáltico convencional.

Figura 21 - Comparação do desenvolvimento de patologias entre o CAP e o pavimento com asfalto borracha



Fonte: WAY et al., 2019

Way et al. (2019) destacam que a principal diferença na resistência entre o asfalto convencional e o asfalto-borracha reside na maior elasticidade do segundo, permitindo que ele retorne ao seu estado original após deformações, o que o torna mais resistente à fadiga.

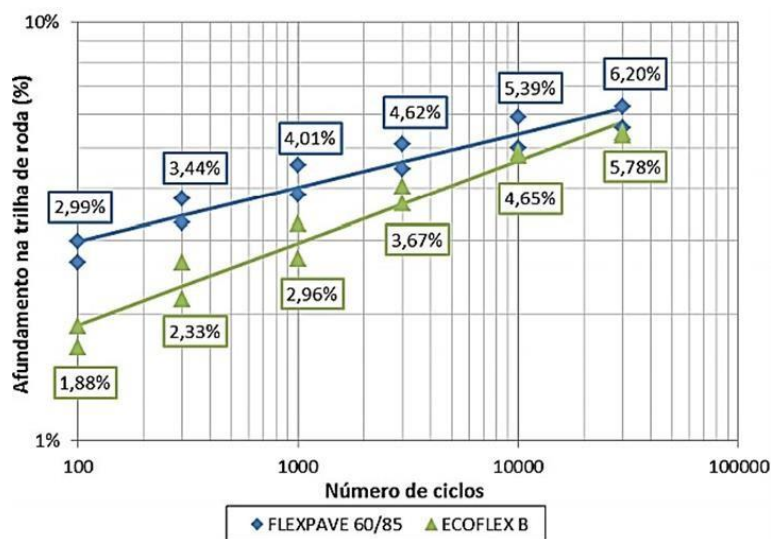
Com o objetivo de proporcionar maior durabilidade e melhor custo-benefício, fatores cruciais para a satisfação dos usuários das vias, novas tecnologias estão em constante desenvolvimento, e o asfalto-borracha tem se destacado nesse aspecto. Estudos conduzidos por Catapreta et al. (2016) demonstram que o asfalto modificado

com borracha apresenta alta flexibilidade e elasticidade, o que possibilita uma melhor adaptação às cargas veiculares, indicando sua viabilidade como uma alternativa eficaz.

É importante ressaltar que o asfalto modificado traz melhorias significativas em relação à mistura asfáltica convencional. No entanto, como já contextualizado anteriormente, cada material possui propriedades específicas que influenciam em sua aplicação prática. Portanto, a viabilidade de uso deve ser avaliada considerando suas características específicas, como será abordado e analisado adiante.

Ao analisar diversos ensaios, foi possível obter diferentes perspectivas práticas sobre o desempenho dos diferentes tipos de asfalto modificado. Um dos parâmetros avaliados foi a deformação permanente, verificada por meio do ensaio de afundamento de trilha de roda com a repetição de um eixo de roda simples sobre a mistura asfáltica (Marques, 2018). A Figura 22 apresenta a comparação entre o asfalto modificado com polímero SBS (FLEXPAVE 60/85) e o asfalto-borracha (ECOFLEX).

Figura 22 - Análise da deformação permanente dos asfaltos modificados



Fonte: MARQUES, 2018

Ao realizar os mesmos ensaios em ambos os tipos de asfalto, foi observado que o asfalto-borracha apresentou menor deformação, com uma taxa máxima de 5,78%, enquanto o asfalto modificado por polímeros registrou uma deformação de 6,20%. Essa diferença sugere que a ocorrência de patologias resultantes de deformações permanentes tende a ser mais frequente em pavimentos que utilizam o asfalto modificado por polímeros.

O asfalto-borracha, conforme descrito por Luciano et al. (2017) com base na EP de 2014, consiste na incorporação de grânulos de borracha reciclada no ligante asfáltico. Essa técnica pode ser categorizada em três tipos distintos, dependendo da quantidade de borracha adicionada à mistura de betume para a composição do asfalto-borracha. Essas classificações são as seguintes:

“Betume borracha de baixa percentagem de granulado de borracha (BBB) – Produto fabricado com percentual de borracha igual ou inferior 8% (tolerância $\pm 2\%$) referente ao total da massa do ligante; Betume borracha de média percentagem de granulado de borracha (BBM) – Produto fabricado com percentual de borracha entre 10% a 14% (tolerância $\pm 2\%$) referente ao total da massa do ligante; Betume borracha de alta percentagem de granulado de borracha (BBA) – Produto fabricado com percentual de borracha entre 18% (tolerância $\pm 2\%$) referente ao total da massa do ligante; (EP 2014 apud LUCIANO et al, 2017, p. 03).”

Existem dois processos para a eficiente incorporação de borracha ao betume. O primeiro e mais comumente utilizado é o processo mecânico, que envolve a trituração do pneu para obtenção dos granulados a serem inseridos no processo. O segundo, conhecido como processo criogênico, embora seja eficaz, é inviável economicamente devido à complexidade e ao aumento nos custos de produção (DNIT 150/2015 citado por REIS, 2018).

O DNIT 150/2015 estabelece normas para a adição de granulado de borracha, oferecendo dois processos: o via seca, que envolve a colocação da borracha no misturador da usina de asfalto, podendo também ser realizado na obra. Embora melhore a qualidade do produto final, esse processo resulta em perda significativa das propriedades da borracha (REIS, 2018).

Por outro lado, o processo via úmida envolve a adição do granulado de borracha de pneu na produção do asfalto a quente na usina, em um processo industrializado. Esse método proporciona maior homogeneidade, aproveitando ao máximo as características elásticas e promovendo maior resistência da borracha, o que resulta em maior durabilidade do asfalto e eficiência na obra (ARAUJO, 2015).

Kalil, Oliveira e Ferreira (2017) ressaltam que o investimento na produção de asfalto modificado com borracha pode ser inibido devido ao alto custo inicial decorrente do processo de fabricação, que envolve manter o material em altas temperaturas para usinagem e compactação, além do rigoroso controle desde a fabricação até a aplicação. No entanto, os benefícios em termos de segurança e conforto dos condutores são notáveis, uma vez que o material possui maior

viscosidade, impermeabilidade, adesividade e resistência a fatores ambientais e químicos, o que aumenta o atrito entre o pneu e o pavimento, reduzindo o risco de acidentes.

Embora o custo inicial seja um ponto de debate, estudos apontam que a vantagem custo-benefício a longo prazo torna a utilização do asfalto modificado com borracha uma escolha vantajosa em termos econômicos.

4.2. Análise dos Custos

Em termos de valores, a diferença entre o asfalto convencional (AC) e o asfalto-borracha (AB) está nos custos operacionais da camada de rolamento, uma vez que ambos são aplicados sobre camadas de um pavimento flexível. De acordo com o Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO), estabelecido pelo DNIT para manter os custos atualizados, o custo direto do metro cúbico do asfalto convencional é de R\$ 128,64, enquanto o asfalto borracha apresenta um custo de R\$ 151,76 (DNIT, 2022).

Para uma análise mais detalhada, a Tabela 3 apresenta uma comparação abrangente dos custos entre os dois tipos de pavimentos.

Tabela 3 - Comparação de custos de implementação para 1 km de revestimento do pavimento

Tipo de asfalto	Custo da capa derolamento (R\$/t)	Quantidade de massa asfáltica (t)	Custo total
Asfalto-borracha	R\$ 151,76	840	R\$ 127.478,40
Asfalto convencional	R\$ 128,64	840	R\$ 108.057,60

Fonte: DNIT, 2022

Os dados apresentados demonstram que o pavimento com revestimento de asfalto borracha possui um custo inicial aproximadamente 15,2% superior em comparação ao método tradicional. No entanto, estudos têm consistentemente corroborado que esse acréscimo de custo é amortizado ao longo do tempo devido à maior durabilidade dos revestimentos asfálticos que incorporam esse material modificado.

A Tabela 4 oferece uma análise detalhada dos custos associados aos reparos de pavimentos que empregam revestimento convencional de CAP e CBUQ. Ao considerar um período de 10 anos ao longo da vida útil do pavimento, juntamente com os serviços realizados, observa-se que o custo total de manutenção ao longo de uma década é de R\$ 4.909.254,00. Isso resulta em um custo médio de R\$ 66.822,00 ou R\$ 1.524.000,00 por quilômetro.

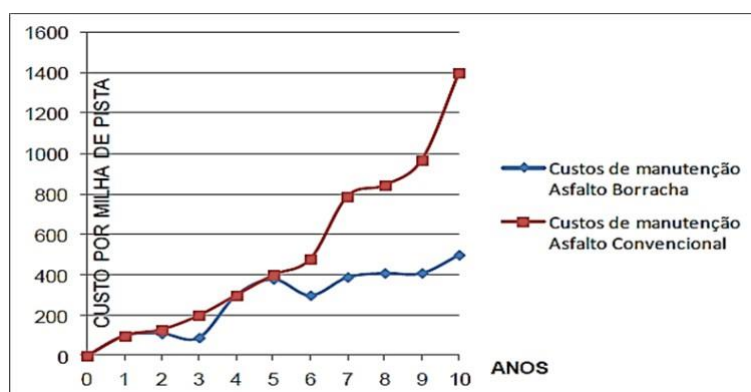
Tabela 4 - Custos de manutenção de um pavimento flexível convencional em um período de 10 anos

Intervenção		Quantidade de intervenção (QI)	Valor/KM (R\$)	Cálculo	Custo total
A	Manutenção	7	R\$ 66.822,00	QI x R	R\$ 467.754,00
B	Restauração	1	R\$ 1.524.000,00	QI x R	R\$ 1.524.000,00
C	Reconstrução	1	R\$ 2.917.500,00	QI x R	R\$ 2.917.500,00
Custo de manutenção em 10anos		-	-	A+B+C	R\$ 4.909.254,00

Fonte: DNIT, 2022

Ao analisar os parâmetros apresentados na comparação da Figura 23, torna-se evidente a evolução dos custos de manutenção, conforme demonstrado pela ADOT (2014), em que ambos os tipos de asfalto foram aplicados sobre uma camada de pavimento de concreto trincado.

Figura 23 - Custos de manutenção por milha de pista (USA \$)



Fonte: ADOT, 2014

Observa-se que nos primeiros anos os custos se mantêm semelhantes, no entanto, a partir do quinto ano, a curva dos custos de manutenção do asfalto convencional apresenta um aumento quase exponencial.

Além disso, ao considerar os testes realizados na rodovia RJ-122, no estado do Rio de Janeiro, onde foram recuperados 35 km de estrada utilizando asfalto-borracha, observa-se, de acordo com Mattioli (2019), que o uso do Heavy Vehicle Simulator (HVS) para medir a evolução da deformação permanente proporcionou um aumento de 30% na vida útil do pavimento, até que atingisse um ponto de deformação que demandasse alguma intervenção.

Por sua vez, Camargo (2016), utilizando o mesmo simulador de tráfego pesado (HVS) e simulando o equivalente a 7 anos de projeto para o tráfego da rodovia, constatou apenas um afundamento de trilha de rodas de 4,2 mm, valor considerado baixo em nível nacional. Não foram detectados trincamentos na região analisada, o que evidencia que, mesmo após um tráfego correspondente a 7 anos, o pavimento ainda não teria atingido o ponto de fadiga.

4.3. Análise Comparativa das propriedades do Asfalto-Borracha

A legislação de pavimentação no Brasil é segmentada com base no tipo de asfalto empregado. O DNIT estabelece normas específicas para cada caso. Para o Cimento Asfáltico Modificado por Borracha de Pneus Inservíveis pelo processo via úmida, do tipo Terminal Blending, é regulamentada pela Norma 111/2019-EM. Já para o Concreto Asfáltico com Asfalto Borracha, também via úmida, do tipo Terminal Blending, o processo de execução e controle de qualidade é regulamentado pela Norma 112/2019-ES (ARAUJO, 2015, p. 37).

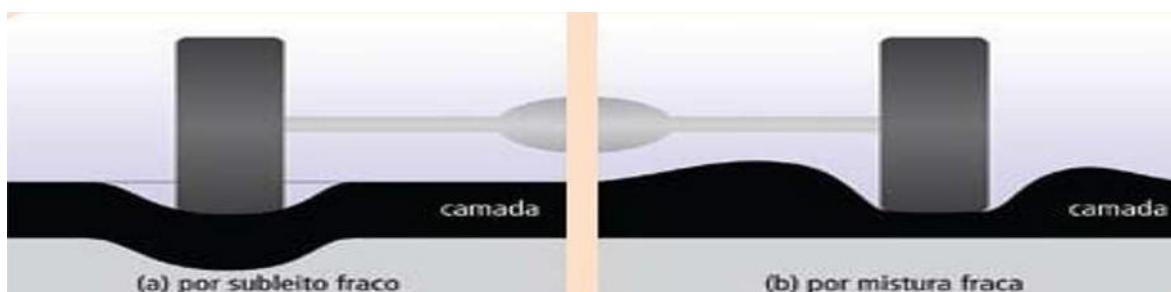
A princípio, o asfalto-borracha pode ter um custo inicial mais elevado em relação ao tradicional na etapa de produção final. No entanto, o benefício real se manifesta ao considerar os custos de manutenção, uma vez que este material reduz esses custos devido à sua resistência à fadiga e à sua maior durabilidade, tornando-se um investimento a longo prazo.

Além disso, a viabilidade desse processo também pode ser observada no contexto ambiental, visto que estudos indicam que a produção de um quilômetro de asfalto-borracha utiliza aproximadamente de 1.000 a 1.200 pneus, evitando assim o acúmulo de resíduos que levariam cerca de 600 anos para se decompor

completamente. Levando em conta que o Brasil descarta cerca de 90 milhões de pneus, totalizando 450 mil toneladas, torna-se evidente a viabilidade da reutilização desses produtos na produção de asfalto-borracha.

A deformação permanente é um dos principais defeitos encontrados nos pavimentos brasileiros. A Figura 24 ilustra esse fenômeno, que muitas vezes se manifesta na forma de afundamentos nas trilhas de roda. Esse tipo de deformação ocorre, em grande parte, devido à baixa resistência ao cisalhamento da mistura asfáltica, o que faz com que o asfalto não consiga suportar o tráfego repetido de veículos de carga sobre o pavimento flexível.

Figura 24 - Afundamento ou deformação permanente



Fonte: CAMARGO, 2016

A deformação permanente, tal como ilustrada na Figura 22 no asfalto convencional, é classificada como depressão na superfície do pavimento, podendo ou não estar acompanhada de solevamento. Esta definição está contida nas normas do DNIT 005/2018-TER, que caracteriza a deformação como um afundamento plástico ou consolidação (DNIT, 2018).

Outra vantagem notável da utilização do asfalto borracha, especialmente no que se refere a deformações permanentes, está relacionada às variações de temperatura. A adição de grânulos de pneus moídos fortalece a resistência a essa forma de deterioração, principalmente em condições de temperatura associadas à deformação permanente. Contudo, é importante ressaltar que, de modo geral, a trabalhabilidade do material é afetada. Esses resultados foram obtidos por meio da comparação entre o asfalto convencional e o asfalto borracha em testes realizados em um simulador de tráfego (PESSOA et al., 2019).

Figura 25 - Comparação entre revestimentos asfálticos após experimento com o uso das misturas asfálticas



Fonte: PESSOA et al., 2019

Os resultados obtidos enfatizam os benefícios do uso do asfalto borracha, com dados estatísticos indicando uma vida útil superior em 30% quando comparado ao asfalto convencional (PESSOA et al., 2019). É importante destacar que a capacidade reológica desempenha um papel crucial no envelhecimento do ligante, especialmente em condições de alta temperatura e grandes superfícies específicas, como ocorre nas etapas de usinagem, manuseio e espalhamento antes da compactação. Nesses cenários, o envelhecimento pode resultar em um aumento de duas a quatro vezes na viscosidade original do CAP em menos de duas horas (PESSOA et al., 2019, p. 31).

Em resumo, o desgaste do material asfáltico está intrinsecamente ligado ao seu processo de endurecimento, que envolve mudanças nas características do asfalto desde o armazenamento até a aplicação e utilização. Observa-se ainda que o envelhecimento é fortemente influenciado pela interação entre a temperatura e a exposição do ligante ao oxigênio do ar (PESSOA et al., 2019, p. 249).

“O asfalto é um composto orgânico, capaz de reagir com o oxigênio do meio ambiente. Os compósitos do asfalto se modificam com as reações da oxidação produzindo um material de estrutura mais quebradiça. Essa reação é referenciada como enrijecimento devido ao envelhecimento ou à oxidação (PETERSON, 1984, p.11). “

O asfalto borracho apresenta um notável benefício devido à sua menor taxa de envelhecimento, o que se deve à presença de elementos como o carbono e antioxidantes que reagem de forma favorável, aumentando assim sua capacidade reológica.

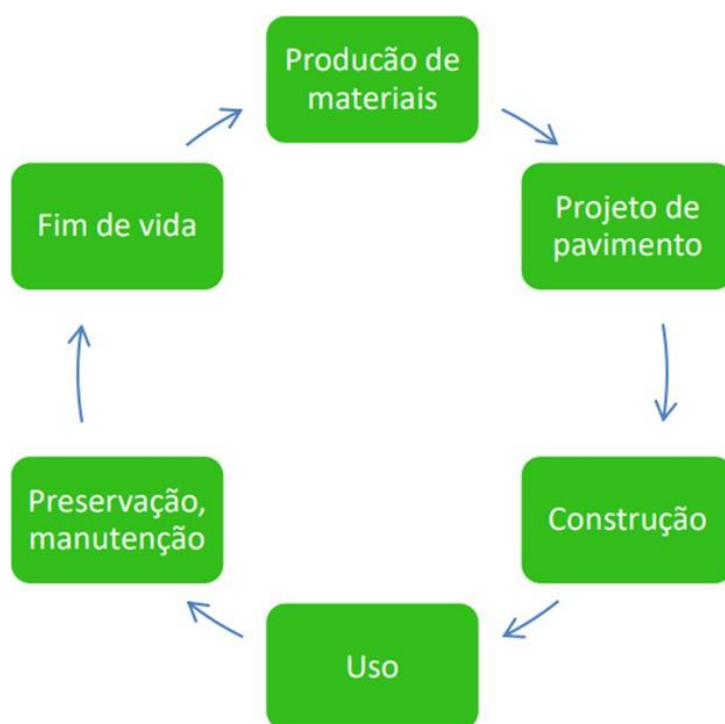
Nesse contexto, diversos autores têm se empenhado em pesquisas para mitigar os impactos causados por patologias relacionadas à deformação permanente, especialmente no que diz respeito ao fator temperatura. Zatarini et al. (2017) ressaltam a importância de manter a temperatura mínima de compactação em torno de 155 °C a 160 °C, evitando o superaquecimento da massa, que poderia resultar em trincamentos, e a formação de ondulações na frente do rolo (ZATARINI et al., 2017, p. 45).

4.4. Sustentabilidade dos Pavimentos Flexíveis com Asfalto-Borracha

Um pavimento sustentável é aquele que não apenas atinge seu objetivo de projeto, mas também, em uma perspectiva mais abrangente, consegue suprir as demandas da sociedade, empregando os recursos naturais de maneira eficiente e ainda preservando e restaurando os ecossistemas ao redor (VAN DAM et al., 2015).

Nesse sentido, para que um pavimento seja classificado como sustentável, é crucial que seu ciclo de vida seja otimizado, visando prolongar sua utilização através de práticas de manutenção adequadas, e que, ao final de sua vida útil, seja possível reutilizar seus materiais na construção de um novo pavimento. Essa abordagem é esquematizada de forma elucidativa na Figura 26.

Figura 26 - Ciclo de vida de um pavimento sustentável



Fonte: VAN DAM et al., 2015

A Figura 26 ilustra de forma cíclica as fases interdependentes que compõem o processo de pavimentação, demonstrando a relevância de cada etapa e sua integração, em consonância com os princípios de economia circular e sustentabilidade. Essa abordagem visa estabelecer um ciclo contínuo de reutilização de recursos.

Conforme salientado por Ruth et al. (2007), ao longo de décadas, pesquisadores têm se dedicado ao desenvolvimento de técnicas de modificação do asfalto, com ênfase na questão da sustentabilidade. Nesse contexto, propõe-se a incorporação de borracha reciclada de pneus inservíveis como aditivo, visando aprimorar as propriedades do ligante e reduzir o impacto ambiental associado à disposição inadequada de pneus.

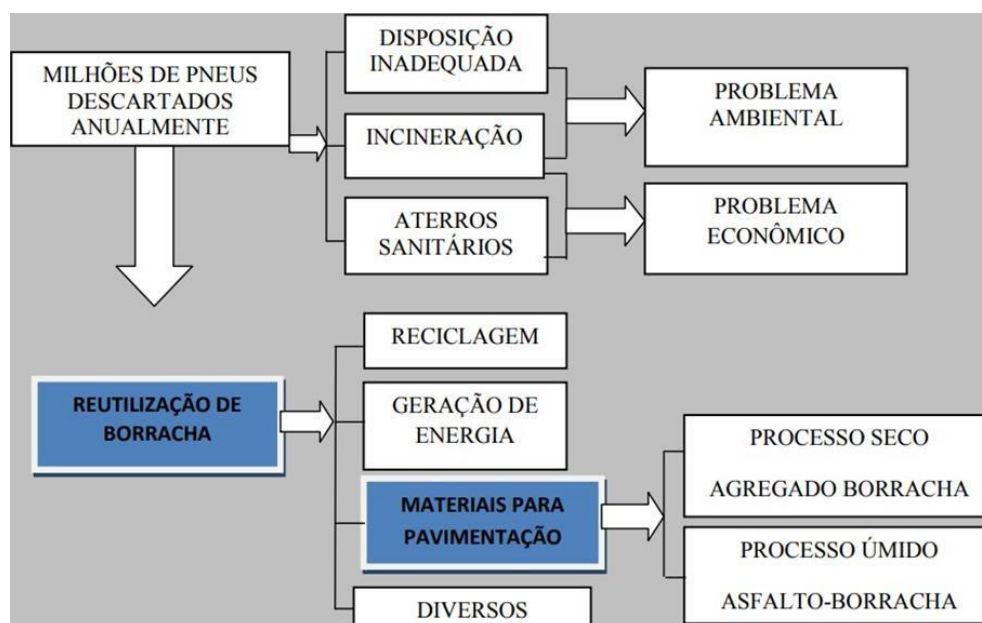
Essa abordagem reflete a aplicação dos princípios de desenvolvimento sustentável e preservação ambiental no contexto da pavimentação, em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela Agenda 2030 da ONU. Esta agenda orienta as ações para promover o desenvolvimento sustentável e aprimorar as práticas ecológicas.

Ao considerar a sustentabilidade dos pavimentos, torna-se evidente a sinergia entre os conceitos de composição ecológica do asfalto-borracha. Esse tipo de pavimento utiliza pneus como componente ligante, impedindo que se tornem fontes de poluição, ao mesmo tempo em que promove a reciclagem eficaz de um recurso natural, derivado do petróleo. Além disso, destaca-se que a borracha utilizada em conjunto com o asfalto convencional resulta em um pavimento com propriedades superiores ao material tradicionalmente empregado.

O processo de criação do asfalto-borracha envolve a preparação da mistura asfáltica e a utilização eficiente de resíduos sólidos, conforme preconiza a resolução 307 do CONAMA. Essa resolução estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos provenientes da construção e demolição, incluindo o descarte de pneus. Essa prática visa aprimorar as características do pavimento, como resistência, aderência e permeabilidade (BRASIL, 2017).

De acordo com Tavares (2013), a Figura 27 proporciona uma visão esquemática do reaproveitamento de pneus descartados, evidenciando os impactos ambientais positivos e os potenciais métodos de utilização.

Figura 27 - Ciclo de reaproveitamentos de pneus descartados



Fonte: TAVARES, 2013

O grupo CCR AutoBan destaca-se como um exemplo emblemático de aplicação da sustentabilidade no contexto do pavimento ecológico. Desde 2017, a CCR emprega o asfalto ecológico, produzido a partir de pneus descartados, como parte integrante de suas operações. Um caso exemplar dessa abordagem é a RodoNorte, que, a partir de 2015, passou a empregar técnicas de recuperação na Rodovia dos Bandeirantes, incorporando o asfalto-borracha em 15% das rodovias sob sua concessão. Ademais, a empresa adota uma prática de reciclagem, reutilizando o asfalto removido em conjunto com ligantes de borracha, promovendo um ciclo sustentável de reaproveitamento do material asfáltico. Os dados apresentados na Figura 28 fornecem uma visão detalhada da implementação bem-sucedida do asfalto modificado com borracha no período de 2019 a 2020.

Figura 28 - Volume de Reciclagem e Asfalto Borracha entre 2019 e 2020

Un.	Serviço	Vol. 2019 (m ³)	Valor (R\$)	Vol. 2020 (m ³)	Valor (R\$)
AutoBAN	Asfalto borracha	-	-	22.288	17.518.368
	Reciclagem	-	-	51.446	14.301.988
Rodo Norte	Asfalto borracha	13.204	8.305.294	20.835	13.105.384
	Reciclagem	78.015	10.525.062	122.947	16.586.829
Total		91.219	18.830.356	217.517	61.512.569

Fonte: CCR, 2021

A implementação de pavimentos sustentáveis em território nacional está em plena consonância com a Política Nacional do Meio Ambiente, conforme estabelecido

pela Lei N° 6.938/81. Esta legislação preconiza a necessidade de harmonizar o desenvolvimento econômico-social com a preservação da qualidade ambiental e o equilíbrio ecológico. Além disso, orienta para a definição de áreas prioritárias de atuação governamental, visando a promoção da qualidade e do desenvolvimento sustentável em prol dos interesses da federação, estados e municípios. É relevante destacar que as estradas e rodovias, enquanto patrimônios públicos, são concedidas a empresas privadas para administração e manutenção (BRASIL, 1981).

5 CONCLUSÃO

Ao detalhar os estudos empregados, foi possível confirmar a eficácia do asfalto borracha na extensão da vida útil do revestimento do pavimento asfáltico.

A estrutura de um pavimento, composta por diversas camadas de materiais, funciona como uma espécie de suporte para a distribuição de cargas ao solo. Contudo, um dos principais desafios reside no desgaste da superfície dessa camada, o que demanda manutenções frequentes. Diante dessa necessidade, o estudo aprofundado sobre o asfalto-borracha se mostrou pertinente.

A análise de viabilidade econômica apresentada aqui favorece a implementação do asfalto-borracha em detrimento do asfalto convencional. Evidenciou-se a eficiência do pavimento flexível com aditivo de borracha, que demonstrou resistência a patologias como trincamento por fadiga e redução da deformação permanente.

Dentre as vantagens identificadas, destacam-se a menor suscetibilidade térmica em comparação aos pavimentos com ligante convencional, a maior flexibilidade proporcionada pela concentração de elastômeros na borracha de pneus e a melhor adesão do ligante aos agregados. Além disso, observou-se uma maior resistência ao envelhecimento, graças à presença de antioxidantes e carbono na borracha de pneus, que contribuem para a redução do envelhecimento oxidativo.

No que concerne aos aspectos de sustentabilidade, o asfalto-borracha se destaca como um tipo de pavimento que pode ser reciclado, trazendo contribuições econômicas ao reduzir os custos de materiais. Ele possibilita a extensão do uso por meio da adequação e produção de um novo revestimento asfáltico, além de utilizar o pneu como ligante, evitando que se torne uma fonte de poluição. Todas essas práticas estão em conformidade com as diretrizes estabelecidas pelo CONAMA para o aproveitamento de resíduos sólidos.

Em resumo, a análise revelou que, embora o asfalto-borracha inicialmente demande um investimento maior em comparação ao asfalto convencional, a diferença é compensada a longo prazo devido à sua maior durabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADOT. **Arizona**: Arizona Department of Transportation (ADOT), 2014.

ARAUJO, Diones Henrique. Análise comparativa do asfalto borracha com o asfalto convencional e o asfalto com adição de polímeros. CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL – TCC, 2015, f, 90.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7207: Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 2014.

NBR 12949: Concreto betuminoso usinado a quente – Procedimento, Rio de Janeiro, 2016.

NBR 15166: Asfalto modificado - Ensaio de separação de fase. Rio de Janeiro, 2014.

NBR 15529: - Asfalto Borracha – Propriedades reológicas de materiais não newtonianos por Viscosímetro Rotacional. Rio de Janeiro, 2007.

NBR 9574: Execução de impermeabilização. Rio de Janeiro, 2014.

AZEVEDO. M. T. et al. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 1902p, v.2, 2016.

BALBO, J. T. **Pavimentos asfálticos – patologias e manutenção**. São Paulo, Editora Plêiade, 2017.

BARCA, M. A.; NOGUEIRA, S. P. **Análise das técnicas de conservação de pavimentos rodoviários**. Graduação (Monografia em Engenharia Civil), Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P. e SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**, 2ª. ed. 3ª. Reimp. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2015, 504 f.

BERNUCCI, L.B; ET AL, **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2014.

BRANCO, F., PEREIRA, P. **Pavimentos Rodoviários**. Edições Almedina, Coimbra, 2016.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de Agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. 1981.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução Conama nº 307, de 5 de julho de 2017. Diretrizes, Critérios e processos para o gerenciamento de resíduos da construção civil. **Diário Oficial da União**, Brasília, 17 jul. 20

BRASQUIMICAS. **Conservação e Melhoramentos de Pavimentos Asfálticos**. 2018. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/39774081-Conservacao-e-melhoramentos-de-pavimentos-asfalticos-nov-2018.html>>. Acesso em: 25 ago. 2021.

CAMARGO, F. F. **Field and laboratory performance evaluation of a field-blended rubber asphalt**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2016.

CAPPI, Dauton Marcelo. **Recuperação ambiental de áreas erodidas como alternativa de destino final de pneus inservíveis**. Dissertação de Mestrado apresentado a Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2014. 60 p.

CATAPRETA, C. A. A. et al. Uso da borracha de pneus na pavimentação como uma alternativa ecologicamente viável. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO

AMBIENTAL, 07., 2016, Campina Grande, Pb. **Uso da borracha de pneus na pavimentação como uma alternativa ecologicamente viável.** Campina Grande: Ibeas, 2016. p. 01-06. Disponível em: <<https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2016/III-084.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2022.

CCR. **Asfalto Ecológico.** 2021. Disponível em: <https://www.grupoccr.com.br/ri2010/asfalto_ecologico.html>. Acesso em: 05 jun. 2022.

DA SILVA, Tássia Duarte Romanne; OKIMOTO, Fernando Sérgio. **Resíduos de Pneu Inservíveis na Construção Civil.** 2019. Disponível em: <<https://www.cirsop.sp.gov.br/publicacoes/527>>. Acesso em: 05 jun. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). 2018. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br>. Acesso em: 05 jun. 2022.

DNIT. **DNIT 005/2018 – TER: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia.** Rio de Janeiro, 2018, 12 p.

DNIT. **Manual de pavimentação.** Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, 2016.

DNIT. Índices de Reajustamentos de Obras Rodoviárias. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/indices-de-reajustamentos/indices-de-reajustamentos-de-obras-rodoviario/indices-de-reajustamentos-de-obras-rodoviaras>>. Acesso em: 27 jun. 2022.

DOMINGUES, F. A. A. **Manual para identificação de defeitos de revestimentos asfálticos de pavimentos.** São Paulo, 2016.

EMCONBRAS. **Pavimentação e Terraplenagem.** 2014. Disponível em: <<http://www.emconbras.com.br>>. Acesso em: 05 jun. 2022.

FAXINA, A. L. **Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante do tipo asfalto-borracha.** 2017. 338p. Dissertação (Mestrado em Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos-EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2017.

FIGUEIREDO, N. P. D. **Avaliação e Conservação de Pavimentos Rodoviários Municipais com Baixo Tráfego: Contribuição para uma Metodologia de Apoio.** **Dissertação** (Mestrado em Construção Urbana), Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2016.

GIL, A.C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa.** Edição: São Paulo, editora atlas s.a. 2017.

HANSON, D.I. et al. **Evaluati on and characterization of a rubber-modified hoi mix Asphalt pavement.** Transportation Research Record.1436, p. 98-107, 2018.

JORNAL O LÍDER. **Agora vai? Operários retomam obras no asfalto do interior em São Miguel.** 2016. Disponível em <<http://wh3.com.br>>. Acesso em: 05 jun. 2022.

KALIL, E.; OLIVEIRA, L. D. M.; FERREIRA, V. S.. **Estudo da utilização do asfalto modificado com borracha triturada de pneu no Brasil.** 15th LACCEI International Multi- Conference for Engineering, Education, and Technology: “Global Partnerships for Development and Engineering Education”, 19-21 July 2017, Boca Raton FL, United States.

LEITE, L. F. M. **Curso Básico Intensivo de Pavimentação Urbana – Módulo Básico – Ligantes Asfálticos.** Rio de janeiro, 2018.

LUCIANO, Charles Alexandre Anderson; PAULI, Dayana Beatriz; CARDINAL, Julio. **Pavimento flexível: análise econômica da aplicação do asfalto borracha na br-**

163. Revista dos Cursos de Arquitetura e Urbanismo, Engenharia Civil e Engenharia de Produção ISSN 2525-3204 Vol2, nº 1, 2017.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados.** São Paulo: Atlas, 5ed, 2017.

MARQUES, G. L. O. **Departamento de Transporte e Geotécnica TRN 032 - Pavimentação.** Universidade Federal De Juiz De Fora Faculdade De Engenharia, 2018.

MATTIOLI, Leonardo Miranda Laborne et al. **Plano de gerenciamento integrado de resíduos pneumáticos – PGIRPN.** Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente : Fundação Israel Pinheiro, 2019.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**, ed 1. Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 2018.

MELLONE, G.; SANTOS, M. R.; SHIBAO, F. Y. **Pavimentação de rodovias com uma utilização de resíduos de pneus inservíveis.** Revista Eletrônica Gestão e Serviços V3, São Paulo, p. 489-508, 23 mar. 2013.

MOTTER, Janaína Setin. **Propriedades de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto.** Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, na área de concentração em Materiais e Estruturas, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. 2013.

MOURÃO, F. A. L. **Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA.** Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2013.

PESSOA, F. H. C; CARVALHO, J. C.; REZENDE, L. R.; SOUZA, R. O. **Avaliação Estrutural de um Trecho Experimental da Rodovia DF-205 Oeste.** In: IV Simpósio

Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço – IV SINAPRE, Fortaleza, CE, Brasil, v. 1. pp. 244 – 257, 2019.

PETERSON, J.C. **Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability: state of the art.** Em: Transportation Research Record. n. 999; p. 13-30, 1984.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico.** 2. ed. – Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

REIS, R. M. M. **Revestimento Asfáltico Tipo SMA para Alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado.** Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica/USP, São Paulo, SP, 2018.

RENE CE. **INTRODUÇÃO - PAVIMENTO – DEFINIÇÃO.** 2016.

RODRIGUES, W. C. **Metodologia Científica.** Paracambi: FAETEC/IST, 2007.

ROSA, Ana Paulo Gonçalves; CRISPIM, Flavio Alessandro; RIVA, Rogerio Dias Dalla; SANTOS, Roberto Aguiar. Análise comparativa entre asfalto modificado com borracha. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.20, p.31-38, Novembro, 2018.

RUTH, B. E.; TIA, M.; JONSSON, G.; SETZE, J.C. **Recycling of Asphalt Mixtures Containing Crumb Rubber.** Final Report. FL/DOT/MO D510717. University of Florida. Florida Department of Transportation. 221p. 2017.

SANTOS, P. R. A. R. et. al. **Caracterização das Patologias no Revestimento Asfáltico de um Trecho da MA-034 em Caxias, Maranhão.** Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC'2017. Hangar Convenções e Feiras da Amazônia, Belém, 2017.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de técnicas de pavimentação: volume 1. 2.** Ed. São Paulo: Pini, 2007. 761 p.

SILVA, F. M., ANHOLETTI, M., JUNIOR, J. C. A. **Estudo dos Afundamentos nos Pavimentos Asfálticos.** Artigo Acadêmico da Faculdade de Engenharia Civil de Capixaba da Serra, 2016.

SILVA, L. S. et al. **Concreto com borracha de recauchutagem de pneu para uso em pavimentação de baixo tráfego.** Rio de Janeiro, Revista Matéria, v.24, n.2, 2019.

SILVA, L. S. et al. **Concreto com borracha de recauchutagem de pneu para uso em pavimentação de baixo tráfego.** Rio de Janeiro, Revista Matéria, v.24, n.2, 2019. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/29002>>. Acesso em: 05 jun. 2022.

SILVEIRA, D. T.; GERHARDT, T. E. Métodos de pesquisa. Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2019.

SOUSA, J. B.; FONSECA, P.; FREIRE, A.; PAIS, J. C. **Comparação da Vida à Fadiga e Deformação Permanente entre Misturas com Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus Convencionais.** Relatório Consulpav EST 99-07. Portugal, 2019.

SOUZA, P. M. **Proposta de implementação do sistema de gerência de pavimentos para a Cidade do Rio de Janeiro.** Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. Graduação em Engenharia Civil. 2015.

TAVARES, Jandson Henrique. **Análise comparativa entre agregados graníticos e calcários para uso em camadas granulares de pavimentos.** Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA, Departamento

de Ciências Ambientais e Tecnológicas para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. Mossoró, RN, 2013.

TRANSPORTA BRASIL. **Pavimento da Rodovia dos Bandeirantes é reconstruído com asfalto ecológico.** 2018. Disponível em <<http://www.transportabrasil.com.br>>. Acesso em: 08 abr. 2022.

VALENZUELA M. **O asfalto na conservação de pavimentos.** Universidade Austral do Chile. Faculdade de Ciências da Engenharia. Escola de Construção Civil, 2018.

VAN DAM, Thomas J., et al. **Towards Sustainable Pavement Systems.** Washington DC: US Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2015.

WAY, G. B. et al. **OGFC Meets CRM: Where the Rubber Meets the Rubber: 12 Years of Durable Success.** Anais do Asphalt Rubber 2000, Vilamoura, Portugal, p. 15-32, 2019.

ZATARINI, Ana Paula Machado; SILVA, André Luiz Ferreira; ANEMAM, Lehi dos Santos; BARROS, Marcos Roberto de; CHRISOSTOMOS, Walbert. **Viabilidade da pavimentação com asfalto borracha.** *Revista Gestão Sustentável Ambiental*. Florianópolis, v. 5, 20