



**CENTRO UNIVERSITÁRIO FAMETRO
ENGENHARIA CIVIL**

JOHNNY FREITAS SILVEIRA

O USO DA BORRACHA NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

FORTALEZA

2021

JOHNNY FREITAS SILVEIRA

O USO DA BORRACHA NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para obtenção do Diploma de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade Metropolitana da Grande Fortaleza - FAMETRO.

Orientadora: Prof. Msc. Ana Kássia Lopes Gonçalves

FORTALEZA

2021

JOHNNY FREITAS SILVEIRA

O USO DA BORRACHA NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência parcial para obtenção do
Diploma de Graduação em Engenharia Civil,
Faculdade Metropolitana da Grande Fortaleza -
FAMETRO

BANCA EXAMINADORA:

Ms. Ana Kássia Lopes Gonçalves
Orientadora
Professor Universidade ALFA-UNIPAC

Dr. Aline Calheiros Espindola
Examinadora
Universidade ALFA-UNIPAC

Ms. José Breno Ferreira Quariguasi
Examinador
Universidade ALFA-UNIPAC

AGRADECIMENTO

À Deus, pela oportunidade de viver e por mais esta vitória. Aos meus pais, que nunca desistiram de mim, sempre me apoiando. Aos meus colegas que compartilharam comigo os bons e os maus momentos dessa jornada.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB Asfalto Borracha

AIV Índice de envelhecimento de viscosidade

CAP Concreto Asfáltico

CAUQ Concreto Asfáltico Usinado à Quente

CBUQ Concreto Betuminoso Usinado à Quente

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente

CRM Modificador de borracha fragmentada

CTS Coeficientes de susceptibilidade à temperatura

DSR Reômetro de cisalhamento dinâmico

DER Departamento de estradas de rodagem do estado de São Paulo

EVA Etileno vinil acetato

IDT Ensaio de tração indireta

IP Conceito de índice de penetração

PAR Taxa de envelhecimento de penetração

PAV Vaso de Envelhecimento por Pressão

PE Misturas asfálticas modificadas de Polietileno

RFOT Teste de Forno de Filme Rolante

SBR Borracha de butadieno estireno

SBS Estireno butadieno estireno

TFOT Teste de Forno de Filme Fino

LST Temperatura de rigidez limitante do aglutinante

LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Composição de um pavimento de asfalto	16
Figura 02. Descarte inadequado de pneus.	19
Figura 03. Uso alternativo para pneus descartados.	21
Figura 04. Comparação de ligante com ou sem borracha oriunda de pneus.	23
Figura 05. Esquema de FHWA.	26
Figura 06. Estrutura molecular da borracha.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Viscosidade do LA e LAB com 20% de borracha em diferentes teores de OE nas temperaturas 135, 150 e 175°C.	40
--	----

O USO DA BORRACHA NA PAVIMENTAÇÃO COMO MATERIAL ALTERNATIVO

Johnny Freitas Silveira¹
Ana Kassia Lopes Gonçalves²

RESUMO

O pneu é de fundamental importância no cotidiano de toda a população, seja no transporte de passageiros ou de cargas. Entretanto, pneus velhos tornam um agravante problema sanitário e ambiental. Uma maneira de solucionar este problema é a trituração da borracha dos pneus usados, e adicionar essa borracha em misturas asfálticas, sendo uma das alternativas socioambientais e também de facilitação na manipulação do asfalto, com o objetivo de melhorar a durabilidade e a economia de uma rodovia ou estrada, a borracha é usada como material que causa uma baixa manutenção e uma melhor reutilização. Este trabalho acadêmico apresenta o asfalto-borracha usado na pavimentação, com intuito de demonstrar inovações, apontando a importância de um bom pavimento, suas características e o impacto ambiental causados por suas manutenções. Este trabalho procurou analisar as possibilidades, formas e viabilidade dos pneus serem incorporados às misturas asfálticas para pavimentação viária. A metodologia usada neste trabalho foi a revisão de literatura. Pode-se concluir que o uso de borracha na pavimentação, se contrastado ao convencional, permite algumas economias de materiais e prazos, além de uma menor necessidade de manutenção e reparos ao longo do tempo, tendo uma melhor relação custo-benefício.

Palavras-chave: Borracha. Pavimentação Rodoviária. Pavimento. Asfalto-borracha.

ABSTRACT

Tires are of fundamental importance in the daily lives of the entire population, whether in the transport of passengers or cargo. However, old tires make an aggravating health and environmental problem. One way to solve this problem is to crush the rubber from used tires, and add this rubber to asphalt mixtures, being one of the socio-environmental alternatives and also facilitating the handling of asphalt, in order to improve the durability and economy of a highway or road, rubber is used as a material that causes low maintenance and better reuse. This academic work presents the asphalt-rubber used in paving, aiming to demonstrate innovations, pointing out the importance of a good pavement, its characteristics and the environmental impact caused by its maintenance. This work sought to analyze the possibilities, forms and feasibility of tires being incorporated into asphalt mixtures for road paving. The methodology used in this work was the literature review. It can be concluded that the use of rubber in paving, if contrasted to the conventional one, allows some savings in materials and terms, in addition to a lower need for maintenance and repairs over time, with a better cost-benefit ratio.

Keywords: Rubber. Road Paving. Asphalt-rubber.

¹ Bacharelado em Engenharia Civil na UNIFAMETRO. E-mail: Johnny91933395@gmail.com

² Ms. em Engenharia de Transportes pela UFC. E-mail: ana.goncalves@professor.unifametro.com.br

1 INTRODUÇÃO

A engenharia é sinônimo de desenvolvimento e sua evolução acontece constantemente junto com ao progresso intelectual da humanidade. Ela tem várias ramificações e uma delas é voltada às obras de infraestrutura viária, no intuito de promover para o usuário um tráfego confortável e seguro (PINTO; 2018).

Com grande importância para a sociedade moderna, a pavimentação, uma vez bem executada, traz benefícios para ela. Todavia, é importante ressaltar o seu contrário, pois um pavimento mal projetado e executado pode resultar em trincas, exsudação, desagregação, deformações e acidentes. Ou seja, há a necessidade de, antes da execução de uma obra, ser realizado um planejamento e estudo do local proposto para implementação (ZATARIN, 2017).

No Brasil, no final do século XVIII, a primeira estrada pavimentada foi construída por meio das técnicas romanas, fazendo ligação do Planalto Paulista ao porto de Santos, marcando o início de uma nova era, recebendo o nome de Calçada do Lorena. Com o tempo, essas técnicas para a pavimentação foram mudando e se adaptando de acordo com a evolução da engenharia.

Segundo Colavite e Konishi (2015), o principal meio de transporte no Brasil é o rodoviário, apresentando uma grande utilização e produção de pneumáticos. Os pneus que não podem ser mais reformados e/ou utilizados para circulação são considerados inservíveis, e devem ser dispostos adequadamente de forma a atender as legislações ambientais e as normas de saúde pública. Quando dispostos inadequadamente na natureza, os pneus se tornam foco de vetores e representam grande risco de incêndios, além de que, se dispostos em aterros sanitários, dificultam a compactação com a consequente redução da vida útil destes aterros.

A procura por uma melhor qualidade de vida induziu a sociedade a explorar, de uma maneira desenfreada, o planeta nas últimas décadas. Isto ocasiona impacto ambiental, uma vez que afeta os recursos naturais do planeta, motivando a sociedade a buscar novas formas sustentáveis e inovação (LEITE; 2012).

Na área da tecnologia de pavimentação por asfalto, a anexação de materiais reciclados nos pavimentos, com a transferência de matérias-primas virgens, é compreendida como uma chance de poupar recursos naturais e impedir os impactos ambientais associados à extração e transporte desses materiais. Esse episódio pode ser visto como uma alternativa sustentável para um processo de produção com benefícios econômicos e ambientais.

Uma alternativa para reduzir este passivo ambiental é a incorporação dos pneus usados à massa asfáltica para pavimentação viária. A adição da borracha dos pneus inservíveis às misturas asfálticas não reduz apenas o problema ambiental, mas altera e melhora as

características do produto, funcionando como um polímero que diminui o aparecimento de trincas, reduz o ruído, a deformação permanente e o envelhecimento do pavimento, podendo ser empregado no revestimento asfáltico (idem capa de rolamento), camada de ligação (*binder*), ou na regularização ou reforço estrutural do pavimento (SPECHT, 2018).

Este trabalho justifica-se com o propósito de evidenciar os impactos sócio ambientais ligados a utilização de resíduos da borracha, mostrando a importância da pavimentação para o cotidiano. Segundo Leite (2013), o estudo do pneu aplicado à metodologia do asfalto-borracha foi selecionado por proporcionar, além de uma motivação ambiental, também a possibilidade de reciclagem de grandes quantidades de borrachas derivados dos resíduos de pneus como matéria-prima para um novo tipo de concreto.

Além de impedir que os pneus se transformem em fonte de poluição, esta reciclagem é ambientalmente válida ao empregar ao máximo um recurso natural, que misturado ao cimento asfáltico de petróleo (CAP) resulta em um produto com propriedades técnicas superiores e ambientalmente corretas: o asfalto-borracha.

No Brasil, esta alternativa começou a ser utilizada em 2001, em um trecho da BR-116, no estado do Rio Grande do Sul, a qual em 16 km da rodovia recebeu o asfalto borracha como meio de ligante, posteriormente, há registros de sua utilização em obras de rodovias no estado de São Paulo e Rio de Janeiro (DIAS et al., 2016).

O Brasil tem como o principal de transporte o rodoviário e possui, também, um avanço no transporte de cargas elevadas, o que motiva a deterioração precoce do pavimento. Como alternativa de custo benefício mais baixo, tem se pesquisado e utilizado de meios que possam viabilizar o progresso do transporte, com redução de custos e menos fatores externos que um pavimento precário pode ocasionar, como acidentes, atrasos, danificação de equipamento e mão de obra para manutenção periódica (DNIT, 2010).

A rigidez dinâmica ou “módulo resiliente” é uma medida da capacidade de propagação da carga das camadas betuminosas; ele controla os níveis das deformações de tração induzidas pelo tráfego na parte inferior da camada mais baixa ligada betuminosa que são responsáveis pela fissuração por fadiga, bem como as tensões e deformações induzidas no subleito que podem levar a deformações plásticas.

A rigidez dinâmica é calculada por ensaio de módulo de tração indireta, que é um método rápido e não destrutivo. Em geral, quanto maior a rigidez, melhor é sua resistência à deformação permanente e acasalamento. Zatarin (2017) mostrou que o módulo de resiliência aumentou ou a mistura se comportou de forma mais rígida (a mistura fica mais forte) com a diminuição da temperatura; além disso, conforme o tempo de carregamento aumentou e o

módulo de resiliência diminuiu ou cedeu mais com um tempo de carregamento mais longo. O teste de módulo resiliente à tração indireta é amplamente utilizado como teste de rotina para avaliar e caracterizar materiais de pavimentação.

Existem diferentes métodos de teste usados em todo o mundo para medir a resistência à fadiga de misturas de concreto asfáltico. Nunes (2017) investigou a vida à fadiga de misturas de concreto asfáltico usando o ensaio de fadiga por tração indireta. Durante a fadiga por tração indireta, a deformação horizontal foi registrada em função do ciclo de carga. O corpo de prova foi submetido a diferentes níveis de estresse, a fim de uma análise de regressão em uma faixa de valores. Isso permite o desenvolvimento da relação de fadiga entre o número de ciclos na falha e a deformação de tração inicial em uma relação *log-log*. Vida de cansaço de uma amostra é o número de ciclos até a falha para misturas de concreto asfáltico.

A vida em fadiga é definida como o número de aplicações de ciclo de carga (ciclos) que resultam em desintegração ou deformação vertical permanente (CORDEIRO; PINTO, 2018). O procedimento de teste de fadiga é usado para classificar a resistência da mistura betuminosa à fadiga, bem como um guia para avaliar o desempenho relativo da mistura de agregado asfáltico, para obter dados e informações para estimar o comportamento estrutural na estrada. O dano é definido como qualquer perda de resistência que ocorre em um corpo de prova durante um teste.

Teixeira e Araújo (2018) definiram o módulo resiliente como a razão entre a tensão aplicada e a deformação recuperável quando uma carga dinâmica é aplicada. Neste teste, uma carga cíclica de magnitude constante na forma de onda Haversine é aplicada ao longo do eixo diamétrico de um corpo de prova cilíndrico por 0,1 segundos e tem um período de descanso de 0,9 segundos, mantendo assim um ciclo por segundo.

Os Resíduos Sólidos são definidos como: resíduos contidos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição (ABNT, 2004).

São categorizados quanto a origem das fontes geradoras como: resíduo domiciliar: gerados pelas atividades domésticas; Resíduos Industriais; Gerados pelas atividades e processos de produção; Resíduos de serviços de saúde: Originados em ambiente hospitalar; Resíduos de Portos, Aeroportos e terminais Rodoviários e Ferroviários: Tratado como resíduos séptico, podendo conter agentes infecciosos de outros locais; Entulho: Resultante da construção civil e de reformas, podem ser reaproveitados quase que em sua totalidade. São classificados de diversas formas as quais se baseiam em características e propriedades, como natureza física, composição química e periculosidade, esta última realizada em relação a apresentação de riscos

à saúde pública ou ao meio ambiente. Divide-se em Resíduos Perigosos, Não Perigosos e Inertes (SILVA; ANDREOLI, 2010).

Já com relação à tratamentos aplicados aos resíduos, existem a Incineração: usada para queima de materiais hospitalares, tendo um custo alto para sua realização por ter que seguir etapas de segurança; a Reciclagem: onde o resíduo descartado se torna matéria prima, minimizando os impactos ao meio ambiente e à saúde pública; e a Compostagem: que configura um beneficiamento da matéria orgânica, transformada em adubos (SOUZA et al., 2011).

Em pesquisa nacional sobre saneamento básico realizada pelo IBGE, os dados evidenciaram que 3,79% dos municípios possuem unidades de compostagem de resíduos orgânicos; 11,56% possuem unidades de triagem de resíduos recicláveis; e 0,61% possuem unidades de tratamento por incineração (GRANJEIRO et al., 2017).

A Lei nº 12.305 regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que consiste em uma iniciativa Federal que estabelece orientações em relação aos hábitos de consumo considerados saudáveis como, segregação dos resíduos, reciclagem, destinação correta, e tratamento adequado dos rejeitos alimentares. Tendo como foco o enfrentamento das questões ambientais decorrentes do manejo inadequado destes (CEARÁ, 2016).

Para tanto as três esferas governamentais articulam-se no sentido de organizar a gestão, integralizando metas que tenham por finalidade minimizar e prevenir os impactos ambientais decorrentes do manejo inadequado. Propõe ainda a adoção de hábitos mais sustentáveis, como a redução, reutilização e reciclagem dos resíduos aproveitáveis; ou destinação ambientalmente adequada dos rejeitos, contribuindo assim para uma das metas da legislação Federal, que é a eliminação dos lixões (RAMOS et al., 2011).

Outro ponto importante é a responsabilidade institucionalizada e compartilhada entre todos os membros da cadeia produtiva, dos fabricantes aos cidadãos consumidores (SANTOS, 2016).

Partindo deste ponto de vista, este trabalho levanta a seguinte problemática: uma revisão de literatura acerca da utilização do asfalto borracha na sociedade, apontando os ônus e bônus de utilizar desta tecnologia para agregar um custo-benefício adequado ao progresso social.

Com base nesses apontamentos, o presente estudo tem como objetivos geral analisar as inovações, possibilidades, formas e viabilidade dos pneus serem incorporados às misturas asfálticas para pavimentação viária. Mediante o exposto, a pesquisa tem como objetivos específicos i) realizar um estudo bibliográfico exploratório sobre as obras e estudos sobre a utilização do asfalto borracha (AB), ii) demonstrar os benefícios ou danos relacionados ao meio

ambiente através de uma análise de impactos ambientais e iii) apontar o custo benefício de modo comparativo do AB ao CAP.

Metodologicamente, fez-se necessário analisar estudos nacionais e internacionais sobre o objeto de pesquisa em comum, afim de apontarmos empiricamente e qualitativamente as perspectivas das pesquisas, trazendo neste trabalho seus resultados, assim como predisposto nos seus objetivos.

Os resultados obtidos por intermédio desta pesquisa têm como finalidade apresentar qualitativamente à sociedade a viabilidade do uso do AB e como este tem se apresentado de forma evolutiva para ela.

Quanto à organização deste trabalho, ele é estruturado por seis tópicos, sendo esta a introdução o primeiro composto, onde apresenta-se o tema e o que será abordado durante o mesmo. Consequente, apresenta-se o referencial teórico, com uma contextualização sucinta sobre o tema. No terceiro tópico, relata-se percurso metodológico da análise exploratória, seguido do quarto tópico, sendo este a análise e discussão de resultados. Subsequente, aponta-se o quinto tópico com as conclusões obtidas e, por fim, com o sexto tópico sendo as referências utilizadas para a construção desta pesquisa.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Pavimento

O pavimento possibilita que a mobilidade de pessoas e cargas. É vantajoso, pois viabiliza desde o lazer até a movimentação da economia no local de forma mais ágil. Para o Brasil, ele é economicamente importante, uma vez que a principal forma de transporte no país é a viária.

Segundo Teixeira e Araújo (2018), o pavimento tem uma estrutura com múltiplas camadas, sendo elas de várias espessuras sobreposta à superfície da terraplanagem, afim de suprir os impactos que o tráfego de veículos e o clima causam.

O pavimento flexível tem diversas camadas e sua característica é resistir e distribuir os esforços em parcelas equivalentes, portanto, após um carregamento, todas essas camadas são afetadas e trabalham em conjunto. Segundo Pinto e Pinto (2018), é o pavimento no qual a absorção de esforços dá-se de forma dividida entre várias camadas, encontrando-se as tensões verticais em camadas inferiores, concentradas em região próxima da área de aplicação da carga. É composto por uma camada superficial asfáltica que estão apoiadas em camadas de base, sub-base e de reforço do subleito.

O pavimento semirrígido é um revestimento considerado como intermediário, ficando entre o flexível e o rígido. Esse pavimento tem uma deformidade maior que o rígido e menos que o flexível.

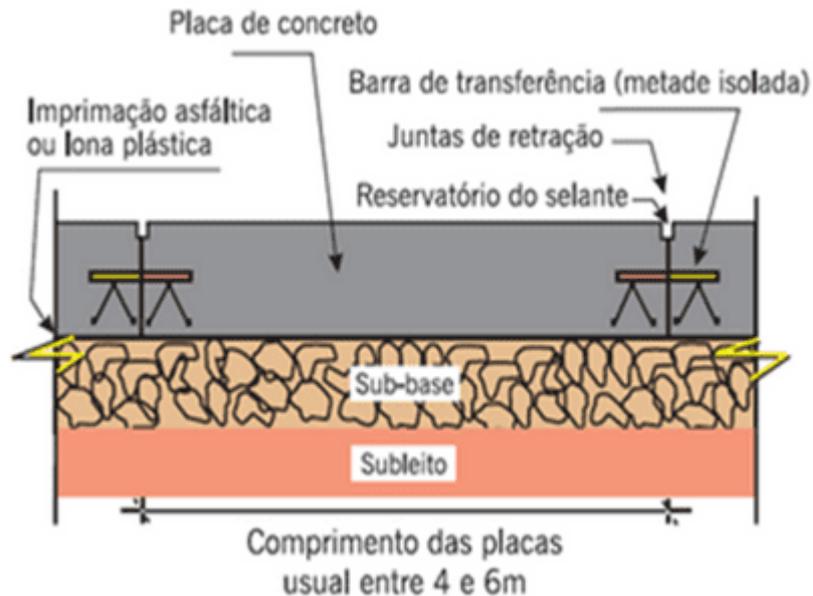
O pavimento semirrígido é o tipo de pavimento composto por revestimento asfáltico e divisões de base ou sub-base em material consolidado com acrescentamento de cimento. Este pavimento tem uma deformabilidade maior que o pavimento rígido e menor que o pavimento flexível. O pavimento semirrígido pode ser do tipo direto quando a camada de revestimento asfáltico é realizada sobre camada de base cimentada, ou da forma indireta, quando a divisão de revestimento é realizada sobre camada de base granular (BARBOSA, 2016).

2.2 Camadas do pavimento asfáltico e tipos de usinagem

O pavimento é composto pelas seguintes camadas na maioria das vezes revestimento, base, sub-base, reforço de subleito, podendo também ser composto, segundo Canhada *et al.* (2017), por apenas revestimento e subleito, que são exigências mínimas para que seja chamado de pavimento. O revestimento é a parte superficial do pavimento que pode ser composto por materiais aglutinados que evitam a movimentação horizontal do pavimento, pedras cortadas,

paralelepípedo, bloco pré-moldado de concreto, placa de concreto, concreto compactado com rolo, betume e diversas misturas asfálticas.

Figura 01. Composição de um pavimento de asfalto.



Fonte: Adaptado de Canhada et al., 2017.

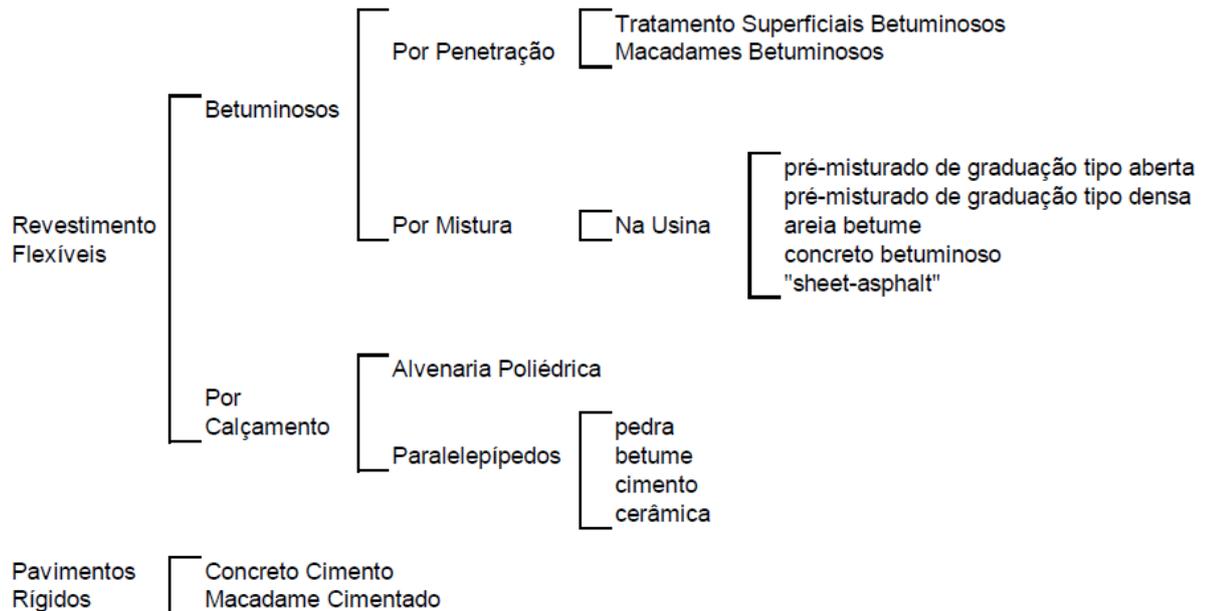
A base e sub-base fazem o papel importante na drenagem do pavimento já que tem contato direto com o revestimento assim impedindo que a superfície crie lâminas de água o que impede a aderência do veículo com o pavimento. Elas são muito importantes na parte estrutural do pavimento já que são elas que distribuem todas as forças para as outras camadas (CANHADA *et al.*, 2017).

Geralmente as bases e sub-bases são compostas por agregados como brita e vários tipos de materiais que podem ser usados, uma vez que cada composto possui devidas funções, desde ligante e misturas asfálticas. As sub-bases são usadas geralmente para que o custo se barateie já que podem ser usados materiais para funções diferente (CATAPRETA; ZAMBIASI; LOYOLA, 2016).

O Subleito é composto por material natural e é ele que recebe todos os esforços causados no pavimento, por isso que é bem compactado podendo ser o solo local ou também um solo transportado. O reforço de subleito é composto por um solo com mais capacidade de suporte, assim pode aderir mais os esforços sendo uma camada mais elástica, não é de uso obrigatório podendo aumentar a espessura das demais camadas, por questão de uso financeiro pode ser uma questão importante caso haja um solo que não atenda as características básicas estruturais camadas (CANHADA *et al.*, 2017).

O pavimento rígido é um revestimento composto por placas de concreto de Cimento Portland (PCS) que pode durar até 30 anos; Já o pavimento flexível é composto por revestimento asfáltico (CAUQ) em uma estrutura de múltiplas camadas que dura, aproximadamente, 10 anos (CATAPRETA; ZAMBIASI; LOYOLA, 2016).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, em seu manual de pavimentação estabelece a seguinte classificação dos revestimentos:



Fonte: Manual de Pavimentação DNIT (2006).

No Brasil, as misturas flexíveis são as mais frequentes, devido a viabilidade social que possui, para o aproveitamento de pneus escartados. Todavia, é importante ressaltar quanto aos processos que se aplica para deter de tais meios, sendo elas: misturas usinadas, usinadas a frio, não usinadas e usinadas a quente. Passando por uma produção de concreto asfáltico.

As misturas usinadas a quente, que possui um valor granulométrico empregado e particularidades quanto à sua mecânica, uma vez que é composta de, 95% de pedra, areia ou cascalho, unido por cimento asfáltico, um produto de petróleo bruto. Posteriormente é aquecido, misturado com o agregado e posteriormente transportados até o local de pavimentação e espalhado por vibroacabadora (BERNUCCI et al., 2008).

Este processo de misturas usinadas a quente possui um alto grau de resistência, entretanto, requer um controle de qualidade e produção elevado, para que atenda ao padrão de ordem DNIT na construção de rodovias (DNIT; 2006).

2.3 A indústria e atuação sustentável

Conforme Garlet (1996), a indústria é grande produtora de resíduos que geram impactos ambientais em larga escala, devido o alto teor de gravidade, dificuldade de decomposição e alta produção. Sendo estes resíduos: borracha sintética elastomérica Estireno Butadieno (SBR) e elastomérica termoplástica Etileno Acetato de Vinila (EVA), no processo de fabricação de pneus, solados, calçados tipo *flip-flop*.

Tais resíduos podem voltar para sociedade com nova serventia, ou reaproveitamento, na produção de placas, segundo Garlet (1996). Mesmo que algumas indústrias armazenem tais resíduos em galpões, devido o alto volume e mecanismo de reaproveitamento exigir mais cuidados, algumas partem para o descarte indevido e ocasionando impactos ambientais.

Deste modo, vê-se necessário estudos e pesquisas para melhorar a atuação das indústrias e viabilizando a criação de novos meios pavimentação, uma vez que os componentes de tais resíduos possuem características viáveis para a manipulação de concreto asfáltico

2.4 Tipos de borracha e sua composição

A borracha faz parte de um grupo de materiais industriais conhecidos como materiais de engenharia, que inclui metais, fibras, concreto, madeira, plásticos, vidros, dos quais depende parte da tecnologia moderna (CORDEIRO, 2019, p. 08). Apesar de ser um material já utilizado há muito tempo, somente ganhou aceitação após a descoberta do processo de vulcanização, pois até então o material apresentava problemas de trabalhabilidade quando sólido. Seus produtos apresentam alta viscosidade quando expostos ao calor e rígidos em tempo frio, sendo quase que inflexíveis em invernos rigorosos, além de exalarem odores desagradáveis após curto período.

Existem dois tipos de borrachas: os naturais, extraídas diretamente da natureza e as sintéticas ou artificiais. A borracha natural é obtida a partir da coagulação de uma substância leitosa, chamada de látex, produzida por algumas espécies vegetais, em especial as da família das Euphorbiaceae, sendo quase toda a produção mundial extraída da *Hevea brasiliensis*, espécie nativa da América do Sul e popularmente conhecida como seringueira (BARBOSA, 2016).

A borracha sintética, diferente da borracha natural, é produzida artificialmente, sendo derivada do petróleo ou gás natural. É um polímero, do tipo elastômero, com características e propriedades físicas semelhantes às da borracha natural. O tipo mais difundido mundialmente

é a borracha de butadieno estireno (SBR), poli-isopreno, polibutadieno, Butílica, Butílicas Halogenadas, Policloropreno, Polietileno Clorado, Cloro Sulfonado.

Existem pneus para os mais diversos tipos de veículos e suas aplicações: para tratores, máquinas e equipamentos pesados da construção civil, para transporte de cargas especiais, aviões, veículos de competição, entre outros. A carcaça é reforçada por uma manta de *nylon* e as camadas superiores são constituídas pela moldagem da mistura de borrachas com uma malha de arame de aço entrelaçado, formando a estrutura.

2.5 Descarte de pneus

Os pneus que ainda não apresentam uma total deterioração podem ser reformados, tendo sua vida útil estendida por mais certo período. Este processo, conhecido como recauchutagem, utiliza a carcaça do pneu usado onde é colocada nova camada de borracha na banda de rodagem e nos ombros (CERATTI; REIS, 2017). Os pneumáticos podem ainda ser remoldados, processo parecido com a recauchutagem, porém com a remoção da borracha da carcaça, sendo o pneu reconstruído.

Os pneus que não têm mais serventia são considerados inservíveis e precisam ser descartados. Então, surge-se um grande problema, pois demoram cerca de 400 a 600 anos para se decomporem na natureza, além de que, se dispostos de forma incorreta, podem provocar sérios problemas ao meio ambiente e à saúde pública. No ano de 2007, foi criada, pelos fabricantes de pneus do Brasil, uma entidade sem fins lucrativos, chamada *Reciclanip*, com a finalidade de cuidar exclusivamente da coleta e destinação dos pneus inservíveis.

Figura 02. Descarte inadequado de pneus.



Fonte: Google Imagens.

Quando dispostos em aterros sanitários, dificultam a compactação, reduzindo a vida útil dos aterros. No entanto, há depósitos com a finalidade de receber somente pneus, o que é mais aceitável do que os aterros convencionais, por permitir melhor recuperação energética e de matéria-prima, podendo se tornar futuros locais de coleta de pneus para reciclagem (CORDEIRO; PINTO, 2018).

Portanto por serem altamente combustíveis e possuírem substâncias inflamáveis, esses locais estão suscetíveis a incêndios e a consequente poluição do ambiente. A forma de eliminação mais correta ambientalmente é a reciclagem e a reutilização destes materiais, transformando-os em novos produtos ou em matérias-primas para novos insumos.

No Brasil, os pneus precisam ser organizados de forma adequada para atender a Resolução CONAMA nº. 416, de 30 de setembro de 2009 que dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental determinada por pneus que não servem mais e sua destinação ambientalmente apropriada.

O tempo de deterioração de um pneu é de até 600 anos, o que gera um impacto ambiental de grande proporção quando não é devidamente descartado e tratado. O Brasil, devido ao seu alto volume de consumo rodoviário, se tem estatisticamente cerca de 450 mil toneladas de pneus por ano. De acordo com uma pesquisa do Reciclanip, em 2019, obtiveram-se o descarte correto 471 mil toneladas de pneus (RODRIGUES; HENKES, 2016).

O uso do asfalto-borracha no Brasil ainda é uma novidade, mesmo no Estados Unidos sendo uma tecnologia já utilizada a muito tempo, já no Brasil podendo encontrar cerca de 8 mil km feitas do pavimento com borracha, que é um produto com bastante sobras que são descartadas incorreta ententes, por ano são descartadas cerca de 35 milhões de pneus sem utilidade sendo um dos maiores problemas ambientais (ROMANELLI, 2021).

O asfalto-borracha fornece conforto para os usuários, o nível de ruído é menor e seu custo é 25% mais caro do que o asfalto convencional, porém possui uma durabilidade três vezes maior (MONTEIRO JUNIOR *et al.*, 2019).

O asfalto utilizando pneu é 50% mais caro que o asfalto convencional precisando assim de um maior investimento para sua utilização, mas comparando com custo do CAP, que requer muitas manutenções durante a vida, o asfalto-borracha requer baixa manutenção, pois é um pavimento flexível com maior retorno elástico, maior resistência a deformidade plástica e baixa oxigenação, então comparada ao asfalto convencional e o custo que causa seria uma excelente opção para o Brasil um país com um alto número de veículos por dia que são circulados (CORDEIRO, 2019).

A recuperação, através da trituração dos pneus, é outra maneira de se reaproveitar este produto. Os resíduos gerados são moídos, e a borracha neles contida é reutilizada, sendo mais comumente usada como combustível nos fornos das fábricas de cimento, devido ao seu alto poder calorífico, e na pavimentação asfáltica através da mistura ao ligante asfáltico ou aos materiais agregados, mas também em alguns casos conforme Figura 1 eles passam pelo processo de recauchutagem (ZATARIN, 2017).

A borracha moída pode ainda ser usada como agregado na fabricação de concreto usinado para ser utilizado em peças sem função estrutural. Outras formas de reutilização dos pneus usados são: na contenção de encostas e erosões, no artesanato e na fabricação de artefatos de borracha como solas de calçados.

Figura 03. Uso alternativo para pneus descartados.



Fonte: Google Imagens.

A borracha é um fator impactante em vários âmbitos sociais da atualidade, merecendo maior atenção de pesquisadores para sua melhor reutilização, uma vez que também a sua matéria prima é finita.

A borracha pode ser usada para artesanato, como combustível substituindo o carvão pelo seu grande poder calorífico podendo chegar a 12 mil a 16 mil BTUs por quilo, podem ser usados como barragens para colisão de carros, entre outros. Mas o grande uso de que pode causar um

grande impacto ambiental positivo seria o uso em asfalto sendo feita a recauchutagem desse pneu (RODRIGUES; HENKES, 2016).

2.6 Incorporação de pneus ao Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ)

Nas obras de pavimentação, a borracha dos pneus inservíveis pode ser adicionada às misturas asfálticas de duas maneiras: via úmida, onde a borracha é misturada ao ligante e funciona como um polímero e via seca, processo pelo qual a borracha é misturada em forma de agregado à mistura (CATAPRETA; ZAMBIASI; LOYOLA, 2016).

Apesar de terem bons comportamentos e atenderem aos requisitos para um desempenho satisfatório do pavimento, na maioria das aplicações viárias, em algumas situações, os asfaltos convencionais não satisfazem plenamente as necessidades para um perfeito desempenho, sendo necessária a adição de aditivos poliméricos, a fim de modificar as propriedades do ligante asfáltico, melhorando o desempenho e fazendo com que o pavimento atenda as mais diversas situações a que é submetido (RODRIGUES; HENKES, 2016).

O uso de polímeros ocorre quando estes pavimentos são submetidos a situações como rodovias especiais, de intenso tráfego de veículos comerciais e peso crescente por eixo, em aeroportos, em corredores de tráfego pesado, e em locais com condições climáticas adversas onde há grandes variações térmicas entre inverno e verão (SANCHES; GRANDINI; BAIERLE JUNIOR, 2019).

A utilização de asfaltos modificados por polímeros pode diminuir a constância das manutenções e crescer a vida de serviço de pavimentos de lugares de difícil acesso ou de custo muito alto de interrupção do tráfego para reparos. Locais de tráfego canalizado também podem se favorecer com a utilização de asfaltos modificados (RODRIGUES; HENKES, 2016).

Segundo Rosa *et al.* (2018), as partículas de borracha aumentam em média cinco vezes o seu volume, absorvendo, pelas cadeias de polímeros, certos óleos aromáticos contidos no cimento asfáltico, tornando-o mais dúctil, mais viscoso e com menor suscetibilidade térmica.

Além da borracha, podem ser adicionados à mistura aditivos do tipo diluentes, para ajuste da viscosidade do cimento asfáltico. A granulometria da borracha influencia diretamente na temperatura da mistura e no tempo de reação. Quanto menor as partículas, maior a superfície específica, sendo necessária menor temperatura e tempo de mistura para homogeneização do material. De acordo com Rosa *et al.* (2018), com a diminuição de 10°C na temperatura, o tempo de mistura é dobrado. O método de adição da borracha às misturas asfálticas por via úmida, dependendo da forma de produção, é subdividido em dois tipos de processos. O estocável

conhecido como *continuous blending*, e o não estocável também denominado de *terminal blending*.

Figura 04. Comparação de ligante com ou sem borracha oriunda de pneus.



Fonte: Adaptado de Canhada et al., 2017.

No processo seco de incorporação da borracha dos pneus às misturas asfálticas, a borracha é triturada e adicionada diretamente na mistura como um aditivo ao agregado pétreo, substituindo parte deste material, devendo ser utilizado apenas em misturas asfálticas a quente, como o CAUQ ou misturas com granulometrias descontínuas (NUNES, 2017).

Neste processo pedaços sólidos de borracha são acrescentados como substituição de no máximo 5% do agregado. O tamanho das partículas, em um dos processos a seco conhecido como *PlusRide*, desenvolvido na Suécia, segundo Patriota (2018), varia entre 1,60 e 6,40 mm, o ligante modificado com borracha permite aumentar a resistência à deformação permanente e ao trincamento por fadiga, podendo ainda prolongar a vida do pavimento. No entanto, a incorporação da borracha aumenta a viscosidade do ligante além de demandar maior temperatura de usinagem e compactação.

De acordo com Teixeira e Araújo (2018), a granulometria normalmente é a mesma que a utilizada em misturas convencionais, entretanto temperaturas maiores são necessárias para mistura (160-188°C) e para compactação (148-160°C). Uma variável importante neste processo é o tempo de digestão, período necessário para que o ligante interaja com os grânulos de borracha, sendo determinante para o desempenho da mistura.

Pinto e Pinto (2018), de acordo com a experiência sul-africana, observaram que após a mistura da borracha com o agregado pré-aquecido (200-210°C) e com o asfalto (140- 160°C) a

mistura deve ficar reservada a 180°C por no mínimo 1 hora antes do uso. Segundo Cordeiro (2019), a temperatura de mistura deve ser a que atenda ao intervalo de viscosidade entre (150 a 190 °C). Os agregados precisam estar aquecidos, no período da mistura, 10 a 15 °C acima da temperatura do ligante. O componente fluidificante presente nos aditivos para misturas mornas permite reduzir a viscosidade do ligante-borracha, dando mais trabalhabilidade à mistura asfáltica, sem afetar o desempenho do pavimento.

3 PROCEDIMENTOS METOLÓGICOS

Considerando a realidade anteriormente exposta, com o objetivo de apontar a viabilidade e utilização do asfalto borracha na sociedade e no meio acadêmico, junto aos estudos de engenharia, o custo benefício entre o CAP e o AB, demonstrar os benefícios e ônus da utilização desse meio de produção de concreto asfáltico, utilizou-se como método de pesquisa a análise exploratória de obras que evidenciam o que este presente estudo se propõe a trazer. Metrificando, assim, ao leitor o processo evolutivo do objeto deste presente trabalho.

A análise exploratória se deu com a pesquisa empírica através de estudos, relatórios com o tema em comum ao enfoque. Na análise foi possível verificar as alternativas evolutivas e benéficas para uma melhor atuação da engenharia em meio ao social e na construção de rodovias que atendam melhor às normas do DNIT para a construção de pavimento.

Foi delimitado, junto às ferramentas de pesquisa e estudos acadêmicos os tipos de processos para obtenção de asfalto com os padrões solicitados às normas técnicas, procurando atender e comparar a produção asfalto borracha comparado ao asfalto convencional, já muito utilizado desde a evolução da engenharia.

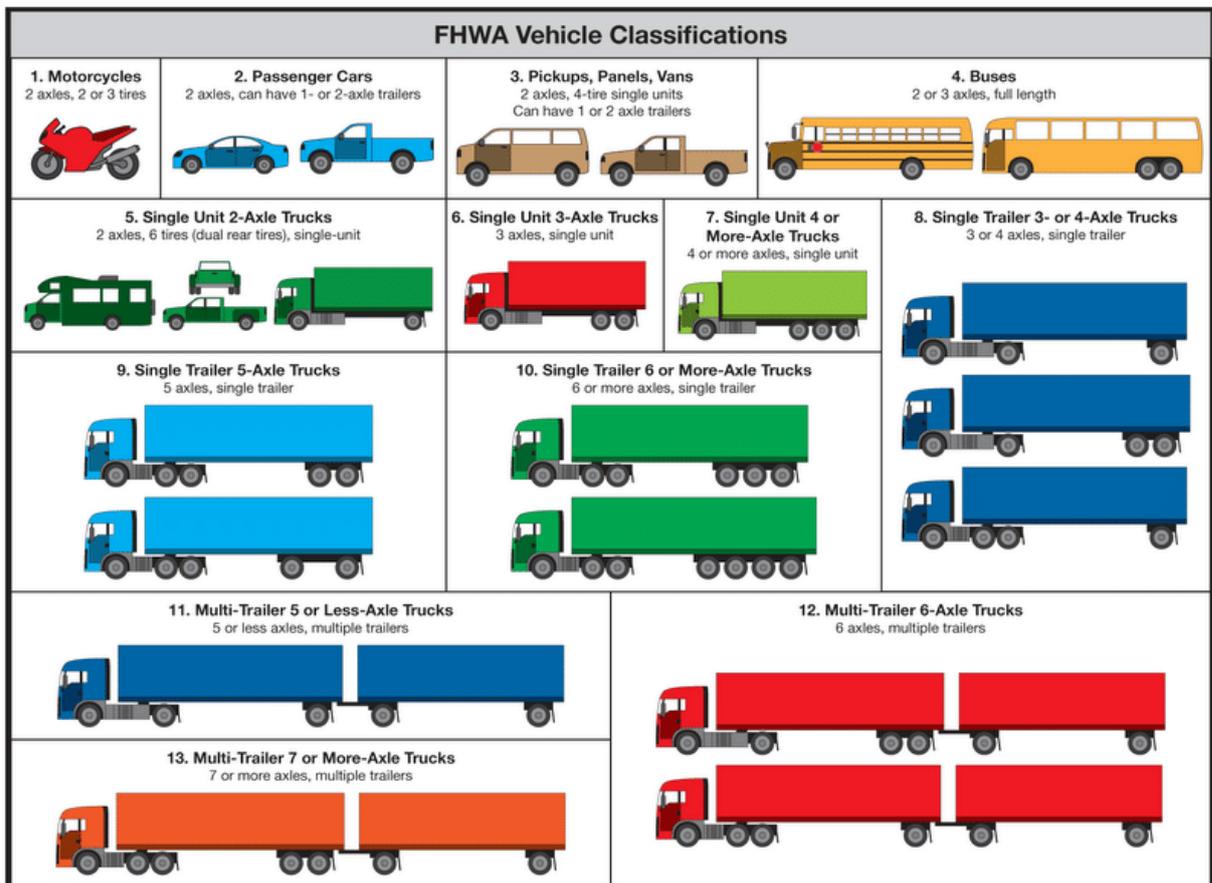
Por meio do método *survey* (FREITAS; 2000) foi aplicado o princípio questionador, afim de nortear a pesquisa com as respostas necessárias junto aos objetivos.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Projeto de pavimento asfáltico

O projeto de mistura asfáltica envolve a seleção e dosagem de materiais para obter as propriedades desejadas no produto acabado. O concreto asfáltico é projetado para resistir a sulcos, fadiga, rachaduras em baixas temperaturas e outros problemas. Os graves problemas associados aos pavimentos asfálticos são a fissuração, que ocorre em temperaturas intermediárias e baixas, e a deformação permanente, que ocorre em altas temperaturas. Esses desgastes reduzem a vida útil do pavimento e elevam os custos de manutenção.

Figura 05. Esquema de FHWA.



Fonte: Adaptado de Texeita e Araújo, 2018.

O cimento asfáltico liga as partículas agregadas, aumentando a estabilidade da mistura e proporcionando resistência à deformação sob tensões induzidas de tração, compressão e cisalhamento. O desempenho da mistura asfáltica é função do cimento asfáltico, agregado e de suas propriedades volumétricas (TEIXEIRA; ARAÚJO, 2018). Nos últimos anos, houve um rápido aumento do uso de aditivos em misturas de concreto asfáltico para melhorar suas

propriedades. Os pavimentos de estradas de asfalto são definidos como camadas de asfalto construídas sobre uma base granular.

Devido a isso, a estrutura total do pavimento sofre desvios devido às cargas de tráfego, por isso esses tipos de pavimentos são conhecidos como pavimentos flexíveis. Uma estrutura de pavimento flexível é composta por várias camadas de materiais. O asfalto é normalmente formado de três componentes materiais: o ligante, o agregado e os finos. Alguns materiais de revestimento incluem aditivos, tais como adesivos, polímeros, fibras e material reciclado. O ligante em uma mistura asfáltica é conhecido como betuminoso, isto é, contém betume em alguma forma.

Os pavimentos flexíveis podem ter uma das três geometrias de seção transversal típicas. Na borda do pavimento, entre a borda do pavimento e o solo adjacente, existem duas forças que são o atrito vertical, e a pressão passiva lateral, a força de atrito depende do movimento relativo, do coeficiente de atrito e da pressão passiva lateral. A pressão passiva lateral varia em função do tipo de solo e do peso do solo submetido ao pavimento (CANHADA *et al.*, 2017).

A cunha do solo é pequena e as duas forças e podem ser ignoradas. Por outro lado, o atrito e as forças passivas, podem ser significativos e a borda do pavimento pode se mover lateralmente e verticalmente. Nas geometrias de seção transversal típicas de pavimentos flexíveis, o concreto asfáltico deve ter alta rigidez para poder resistir à deformação permanente. Por outro lado, as misturas devem ter tensão de tração suficiente na parte inferior da camada de asfalto para resistir à trinca por fadiga após muitas aplicações de carga (CERATTI; REIS, 2017).

Na tensão sob uma carga de roda rolante, o objetivo geral para o projeto de misturas de pavimentação de asfalto é determinar uma mistura econômica e graduação, bem como aglutinante de asfalto que irá produzir uma mistura com aglutinante suficiente para garantir um pavimento durável, estabilidade suficiente, vazios suficientes na mistura compactada total para permitir uma pequena quantidade de compactação adicional sob a carga de tráfego sem descarga e trabalhabilidade suficiente para permitir a colocação eficiente da mistura sem segregação (CANHADA *et al.*, 2017).

O aumento da demanda em rodovias pode reduzir suas propriedades de resistência e tornar as estradas mais suscetíveis a problemas e falhas permanentes. Em geral, as propriedades de desempenho do pavimento são afetadas pelas propriedades do ligante do betume; sabe-se que o betume convencional tem uma gama limitada de propriedades reológicas e durabilidade que não são suficientes para resistir ao desgaste do pavimento (CERATTI; REIS, 2017).

O preço da manutenção do asfalto-borracha é R\$ 6,73 por metro quadrado, já o preço do metro quadrado da manutenção do asfalto convencional é de R\$ 47,11 (CORDEIRO; PINTO, 2018).

Pesquisadores e engenheiros de betume estão procurando diferentes tipos de modificadores. Existem muitos processos de modificação e aditivos que são usados em modificações de betume, como estireno butadieno estireno (SBS), borracha de estireno-butadieno (SBR), etileno vinil acetato (EVA) e modificador de borracha fragmentada (CRM).

O uso de polímeros comerciais como SBS e SBR na construção de estradas e pavimentos aumentará o custo de construção, pois são materiais muito caros (CORDEIRO; PINTO, 2018). No entanto, com o uso de materiais alternativos, como o modificador de borracha fragmentada (CRM), será definitivamente benéfico para o meio ambiente, e não só pode melhorar as propriedades e durabilidade do aglutinante do betume, mas também tem potencial para ser econômico.

4.2 Mecanismo de interação de elementos de borracha asfáltica

Pesquisadores descobriram que, ao incorporar o pó de borracha ao cimento asfáltico, a borracha se degrada e diminui sua eficiência no armazenamento prolongado em temperaturas elevadas. As melhorias realizadas nas propriedades de engenharia da Borracha Asfáltica dependem em grande parte da dispersão das partículas, da dissolução em nível molecular e da interação física da borracha com asfalto. A temperatura e o tempo de digestão são fatores altamente importantes que afetam o grau de dispersão da borracha natural ligeiramente vulcanizada e vulcanizada (CORDEIRO; PINTO, 2018).

Por exemplo, o tempo de digestão ideal para um pó de borracha ligeiramente vulcanizada é de 30 minutos a 180 ° C e 8 h a 140 ° C. Por outro lado, o pó de borracha vulcanizada requer apenas 10 minutos de digestão a 160 ° C para obter os mesmos resultados. A fácil dispersão do pó não vulcanizado deve-se ao estado da borracha e à finura do pó (95 por cento passando na peneira de 0,2 mm) (BARBOSA, 2016).

Os pós vulcanizados são mais difíceis de dispersar porque são mais grosseiros (cerca de 30% retidos na peneira de 0,715 mm e 70% retidos na peneira de 0,2 mm) e devido à vulcanização. De acordo com Ceratti e Reis (2017) existem três estágios de interação que foram avaliados com relação ao aglutinante de borracha asfáltica: um estágio inicial que ocorre imediatamente após a mistura de borracha fragmentada com betume; um estágio intermediário de armazenamento, durante o qual o aglutinante é mantido a temperaturas elevadas por até algumas horas antes de misturar com o agregado; um estágio estendido (armazenamento)

quando as misturas de betume-borracha são armazenadas por longos períodos antes de serem misturadas com o agregado.

O processo via úmido é dividido em sistema estocável e não estocável. No sistema não estocável a adição da borracha é feito com um equipamento na própria obra e é permitido à utilização de partículas maiores de borracha, e o cimento asfáltico de petróleo deve ser aplicado na mesma hora devido à instabilidade de controle do material.

No sistema estocável as borrachas de pneus em partículas finíssimas são misturadas em um terminal especial conforme o item seis da figura 9, produzindo um ligante estável e relativamente homogêneo, este processo é mais confiável devido ao seu controle de qualidade e deve ser processado em altas temperaturas por agitação com alto cisalhamento (CORDEIRO; PINTO, 2018).

Cordeiro e Pinto (2018) investigaram a aplicação de imagem por ressonância magnética nuclear a aglutinante de betume emborrachado. A aplicação dessa tecnologia levou a investigar as diferentes interações entre a borracha triturada e o asfalto, como o inchamento por moléculas de asfalto, a possível dissolução de componentes da borracha no asfalto e a desvolatitização e o cruzamento da borracha. O resultado deste estudo é o inchaço das partículas de borracha que podem depender de moléculas de asfalto.

De acordo com De Holanda *et al.* (2017) os fatores que afetam o processo de digestão das misturas de asfalto e borrachas são o conteúdo de borracha, gradações de borracha, viscosidade do aglutinante, fonte do aglutinante e condições de tempo e temperatura da mistura. (CORDEIRO; PINTO, 2018).

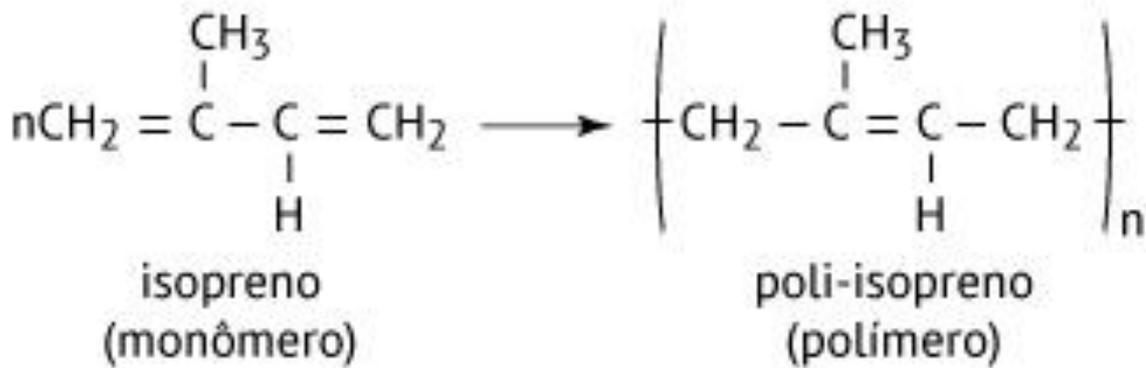
4.3 Elasticidade da borracha do pneu

As principais características da borracha são sua propriedade de alta elasticidade, o que permite que ela sofra grandes deformações, das quais se obtém uma recuperação quase completa e instantânea quando a carga é removida. Esta propriedade de alta elasticidade deriva da estrutura molecular da borracha. A borracha pertence à classe de materiais conhecidos como polímeros e é conhecida como elastômero. As propriedades de uma borracha de elastômero são as seguintes: as moléculas são muito longas e podem girar livremente em torno das ligações que unem unidades moleculares vizinhas (PATRIOTA, 2018).

As moléculas são unidas, química ou mecanicamente, em vários locais para formar uma rede tridimensional. Essas juntas são denominadas reticuladas. Além de serem reticuladas, as moléculas são capazes de se mover livremente entre si; isto é, a força de Van der Waal são pequenas. Semelhante ao asfalto, a borracha é um material termoplástico visco elástico, cuja

resposta de deformação sob carga está relacionada à temperatura e à taxa de deformação. No entanto, a deformação da borracha é relativamente incentivadora à mudança de temperatura onde, tanto em baixas taxas de deformação quanto em temperaturas bem acima do ambiente, o material permanece elástico.

Figura 06. Estrutura molecular da borracha.



Fonte: Adaptado de Patriota, 2018.

A faixa mais ampla de comportamento elástico da borracha em comparação com o do betume resulta em grande parte da reticulação das longas moléculas de borracha. A borracha também é muito mais dúctil do que o betume em baixas temperaturas e altas taxas de carregamento (PATRIOTA, 2018).

4.4 Características reológicas e físicas da borracha asfáltica

A reologia é o estudo do comportamento da fluidez da matéria, avaliando a elasticidade, viscosidade (resistência ao fluxo) e a plasticidade. A viscosidade e a consistência de um produto podem determinar a sua aceitação pelo consumidor (PATRIOTA, 2018).

A susceptibilidade à temperatura foi definida como uma razão das viscosidades newtonianas a 25 ° C e 60 ° C. O teor de ligante na mistura asfáltica é geralmente inferior a 7%, mas desempenha um papel muito significativo nas propriedades gerais do material composto. Isso afeta fortemente a capacidade de distribuição da carga e a resistência à distorção sob tráfego pesado (ROSA *et al.*, 2018). A resposta de deformação de um aglutinante em uma mistura sob carga depende de sua sensibilidade à temperatura; a faixa de temperatura está sujeita à taxa de deformação e à geometria do ligante entre as partículas do agregado.

Portanto, é correto usar um aglutinante com suscetibilidade a temperaturas mais baixas, particularmente quando a faixa de temperaturas de trabalho é muito alta. O conceito de índice de penetração (IP) foi introduzido por Pfeiffer e Van Doormaal para medir tanto a

suscetibilidade à temperatura do aglutinante quanto, em particular, seu tipo reológico em termos de desvio do comportamento newtoniano. PI é obtido a partir do relacionamento.

O asfalto normal de pavimentação de estradas tem um valor de PI entre -1 e +1. O asfalto com PI abaixo de -2 é substancialmente newtoniano e caracterizado por fragilidade a baixa temperatura. O asfalto com PI acima de +2 é muito menos suscetível à temperatura, é menos quebradiço em baixa temperatura, indica propriedades elásticas dependentes do tempo marcadas e mostra desvios do comportamento newtoniano, especialmente em altas taxas de deformação (PATRIOTA, 2018).

Os coeficientes de susceptibilidade à temperatura (CTS) com base em medições de viscosidade na faixa de temperatura de 60 ° - 80 ° C foram usados para avaliar o comportamento do ligante de asfalto emborrachado com a temperatura.

Em 1984, um estudo de pesquisa descobriu que 4% de borracha é eficaz na redução da suscetibilidade à temperatura de ligantes virgens por um fator de pelo menos dois. Conseqüentemente, o asfalto borracha é mais resistente a mudanças rápidas de temperatura. Teixeira e Araújo (2018) investigaram uma boa correlação entre a susceptibilidade à temperatura e as propriedades reológicas do asfalto modificado com borracha fragmentada em termos de elasticidade e dados de ponto de amolecimento.

4.5 Propriedade de viscosidade (resistência ao fluxo)

A viscosidade se refere à propriedade de fluido do cimento asfáltico e é um medidor de resistência ao fluxo. Na temperatura de aplicação, a viscosidade influencia muito o potencial das misturas de pavimentação resultantes. Durante a compactação ou mistura, observou-se que a baixa viscosidade resulta em menores valores de estabilidade e melhor trabalhabilidade da mistura asfáltica (PATRIOTA, 2018).

Rosa *et al.* (2018) usaram um viscosímetro rotacional Haake para medir a viscosidade das amostras de asfalto macio, enquanto a viscosidade das amostras de asfalto soprado é medida em um reômetro capilar. Os testes foram realizados para estudar o comportamento do escoamento na modificação do asfalto com borracha natural líquida (LNR), que favorece a melhor absorção de água.

As conclusões são as seguintes; para asfalto macio, a dependência da temperatura em relação à viscosidade é proeminente até 100 ° C e subsequentemente marginal. A adição de 20% de LNR resulta na viscosidade máxima. A energia de ativação do fluxo do betume macio aumentou, enquanto a do asfalto soprado diminuiu com a adição de LNR.

Canhada *et al.* (2017) descobriram que a viscosidade do cimento asfáltico aumenta com a adição de borracha, e as amostras de asfalto-cimento modificado com borracha mostram uma resistência mais uniforme e maior contra o carregamento conforme a quantidade de borracha aumenta. Os graus de espessamento por cisalhamento e comportamento de diluição por cisalhamento diminuíram com o aumento das quantidades de borracha no cimento de asfalto. A viscosidade dinâmica do liner foi aumentada com o aumento da quantidade de borracha no cimento asfáltico.

De Holanda *et al.* (2017) mencionaram que a borracha vulcanizada teve um grande efeito na viscosidade do cimento asfáltico. A viscosidade, medida a 95 ° C, aumentou por um fator de mais de 20 quando 30% de borracha vulcanizada foi adicionada à mistura. Em contraste, a borracha desvulcanizada teve apenas um efeito muito pequeno. O teste de viscosidade também mostrou que não há perigo de formação de gel quando a borracha é misturada com o cimento asfáltico quente.

4.6 Comportamento físico e desempenho de rigidez

As propriedades de um ligante de asfalto borracha preparado por mistura física de asfalto com grau de penetração 80/100 com diferentes teores de borracha em pó e várias fases de envelhecimento. Os resultados dos valores de penetração diminuíram com o envelhecimento, bem como antes do envelhecimento, aumentando o teor de borracha na mistura. Além disso, os ligantes modificados mostraram valores de penetração mais baixos do que os ligantes não modificados (PATRIOTA, 2018).

Outro estudo sobre mudança de penetração foi conduzido usando misturas de asfalto 80/100 e 70/100 de grau de penetração com diferentes porcentagens de borracha fragmentada. Os resultados mostraram uma diminuição significativa nos valores de penetração do ligante modificado devido ao alto teor de borracha fragmentada nos ligantes.

De acordo com Cordeiro e Pinto (2018), a propriedade de recuperação elástica é muito importante na seleção e avaliação da resistência à fadiga e ao cio. A recuperação elástica é uma propriedade que indica a qualidade dos componentes poliméricos dos ligantes asfálticos.

Nunes (2017), concluiu de seu estudo que a recuperação elástica de ligantes de borracha asfáltica leva a um aumento conforme o tamanho das partículas de borracha diminui. Verificou-se que os tipos de borracha podem afetar as propriedades de ductilidade da força a 4 °C. A modificação da borracha asfáltica resultou em melhor resistência ao acasalamento e maior ductilidade. No entanto, o ligante modificado foi suscetível à decomposição e absorção de oxigênio. Houve problemas de baixa compatibilidade devido ao alto peso molecular. Além

disso, verificou-se que a borracha de pneu reciclada diminui as rachaduras reflexivas, o que, por sua vez, aumenta a durabilidade. Durante a compactação ou mistura, observou-se que a baixa viscosidade resulta em valores de estabilidade mais baixos.

O ponto de amolecimento se refere à temperatura na qual o asfalto atinge um determinado grau de amolecimento. Pinto e Pinto (2018) afirmaram que há uma relação consistente entre a viscosidade e o ponto de amolecimento em diferentes fases de envelhecimento do ligante de asfalto borracha. Além disso, é relatado que o maior teor de borracha fragmentada leva a maior viscosidade e ponto de amolecimento.

Rodrigues e Henkes (2016) relataram que o valor do ponto de amolecimento aumenta conforme o conteúdo do miolo do tubérculo aumenta na mistura. O aumento do teor de borracha na mistura pode ser correlacionado ao aumento na relação asfaltenos/resinas que provavelmente aumentaram as propriedades de enrijecimento, tornando o ligante modificado menos suscetível às mudanças de temperatura.

O principal fator para o aumento do ponto de amolecimento pode ser atribuído ao teor de borracha em pó, independentemente do tipo e tamanho. O aumento do ponto de amolecimento levou a um ligante rígido que tem a capacidade de aumentar sua recuperação após a deformação elástica.

De acordo com Nunes (2017), o teste de ductilidade conduzido em baixa temperatura foi considerado um indicador útil do comportamento quebradiço do betume. Verificou-se que teores de látex na faixa de 3 a 5% resultaram em comportamento não frágil no teste de ductilidade a 5 ° C, enquanto o betume não modificado falhou por fratura frágil no mesmo teste.

A ductilidade diminuiu no caso do betume mole com o aumento da concentração de borracha natural líquida, enquanto alguma melhoria foi observada no caso do betume soprado com 10% de carregamento. A ductilidade é medida a 27 °C e separada a uma taxa de 50 mm/min. Os ligantes de betume modificados mostraram um aumento significativo na recuperação elástica e, em contraste, a ductilidade diminuiu em relação aos ligantes não modificados (NUNES, 2017).

4.7 Durabilidade e envelhecimento da borracha asfáltica

Na mistura de projeto de pavimentação, a prática geral é chegar a um projeto equilibrado entre uma série de propriedades de mistura desejáveis, uma das quais é a durabilidade. Durabilidade é o grau de resistência à mudança nas propriedades físico-químicas dos materiais da superfície do pavimento com o tempo, sob a ação do tempo e do tráfego. A vida útil de uma

pavimentação de estrada dependerá principalmente do desempenho do fornecedor do aglutinante, do projeto da mistura e das técnicas de construção.

O endurecimento do asfalto pode causar rachaduras e desintegração da superfície do pavimento. A taxa de endurecimento é um bom indicador da durabilidade relativa (NUNES, 2017). Muitos fatores podem contribuir para este endurecimento do cimento asfáltico, como oxidação, volatilização, polimerização e tixotropia. Isso porque o asfalto é um composto orgânico, capaz de reagir com o oxigênio do meio ambiente. O compósito asfáltico muda com a reação de oxidação, desenvolvendo uma estrutura bastante quebradiça. Esta reação é conhecida como endurecimento por envelhecimento ou endurecimento oxidativo.

A volatilização ocorre quando os componentes mais leves do asfalto evaporam. Em geral, isso está relacionado às elevadas temperaturas que são encontradas inicialmente durante o processo de produção de asfalto misturado a quente. A polimerização é o meio pelo qual se presume que as resinas se combinem em asfaltenos, resultando em um aumento na fragilidade do asfalto junto com uma tendência para um comportamento não newtoniano. No final da reação, a tixotropia, ou um aumento da viscosidade ao longo do tempo, também contribui para o fenômeno de envelhecimento no asfalto (PATRIOTA, 2008).

No entanto, os fatores mais importantes no processo de envelhecimento do aglutinante de asfalto parecem ser a oxidação e a volatilização. A ocorrência de endurecimento estérico e a associação molecular reversível dependente do tempo afetaram as propriedades do ligante, mas isso não é considerado envelhecimento (SANCHES; GRANDINI; BAIERLE JUNIOR, 2019).

O endurecimento estérico é apenas um fator em temperaturas intermediárias; em altas temperaturas, o excesso de energia cinética no sistema impede a associação e em baixas temperaturas a taxa de associação é considerada mais lenta devido à alta viscosidade do ligante.

Rodrigues e Henkes (2016) estudaram o mecanismo pelo qual as propriedades do ligante podem mudar em baixas temperaturas. Esse mecanismo, chamado de endurecimento físico, ocorre em temperaturas próximas ou inferiores à temperatura de transição vítrea e causa um endurecimento significativo do aglutinante de asfalto. Observou-se que a taxa e a magnitude dos fenômenos de endurecimento aumentam com a diminuição das temperaturas e são relatados como semelhantes aos fenômenos chamados envelhecimento físico em sólidos amorfos.

O endurecimento físico pode ser explicado usando a teoria do volume livre, que introduziu a relação entre temperatura e mobilidade molecular. A teoria do volume livre inclui a mobilidade molecular dependente do volume equivalente de moléculas presentes por unidade de espaço livre ou volume livre. Com base na teoria do volume livre, quando o material amorfo é resfriado de uma temperatura acima de sua temperatura de transição vítrea, os ajustes

moleculares e o colapso do volume livre mostram rapidamente uma queda na temperatura (CORDEIRO, 2019). Nessa temperatura, o estado estrutural do material é congelado e se desvia do equilíbrio térmico devido à queda contínua da energia cinética. Portanto, foi postulado que, para que o endurecimento físico aconteça em ligantes, as temperaturas devem ser mais altas do que a temperatura de transição vítrea.

Muitos testes de durabilidade são baseados na avaliação da resistência ao endurecimento do asfalto. Teixeira e Araújo (2018) investigaram os efeitos do envelhecimento nas propriedades visco elásticas do asfalto emborrachado usando o *Dynamic Shear Rheometer* (DSR). Os ligantes foram envelhecidos com o Teste de Forno de Filme Fino (TFOT), o Teste de Forno de Filme Rolante (RFOT) e o Vaso de Envelhecimento por Pressão (PAV). Esta pesquisa descobriu que o envelhecimento influencia a reologia do asfalto com borracha. As propriedades mecânicas do aglutinante envelhecido melhoraram pelo aumento do módulo do complexo e diminuição do ângulo de fase.

De Holanda *et al.* (2017) realizou um estudo de pesquisa abrangente que avaliou as características de desempenho em alta temperatura de aglutinantes e misturas de asfalto modificados com borracha não modificada e fragmentada. A pesquisa mostrou que o efeito do envelhecimento RFTO no fator de acúmulo de ligantes foi aumentado em baixas frequências e/ou altas temperaturas.

Rosa *et al.* (2018) estudou a influência das propriedades físicas e reológicas do asfalto emborrachado envelhecido. Os resultados indicam que o uso de aglutinante emborrachado reduz o efeito do envelhecimento nas propriedades físicas e reológicas do aglutinante modificado, conforme ilustrado por meio de menor índice de envelhecimento de viscosidade (AIV), menor índice de envelhecimento de menor incremento do ponto de amolecimento, menor taxa de envelhecimento de penetração (PAR), e um aumento com o aumento do teor de modificador de borracha fragmentada, indicando que a borracha fragmentada pode melhorar a resistência ao envelhecimento do aglutinante emborrachado.

4.8 Falha do pavimento da estrada: rachaduras e deformação permanente

Dois tipos de carregamento são de importância específica em conjunto com o desempenho da superfície betuminosa. Um é devido às cargas dos veículos passando sobre a superfície da estrada, enquanto o segundo é devido à contração térmica em relação às mudanças de temperatura.

O carregamento de veículos pode causar problemas em qualquer uma das extremidades da faixa de temperaturas da superfície do pavimento. Em temperaturas elevadas do pavimento,

o aglutinante pode ser extremamente fluido e provavelmente não resistirá à ação de arrancamento e cisalhamento dos pneus do veículo. Em baixas temperaturas do pavimento, o aglutinante pode ser tão duro (especialmente após um longo período de serviço) que o carregamento do veículo causa uma fratura frágil dos filmes do aglutinante (ZATARIN, 2017). Acredita-se que a explicação para esse fenômeno se deva à teoria das “tensões normais” (efeito *Wiesenberger*), que se aplica a materiais viscoelásticos, como uma mistura de betume / sucata de borracha. Essa teoria cobre diferenças normais de tensão, que são forças que se desenvolvem normalmente (ou seja, perpendiculares) à direção de cisalhamento.

4.9 Resistência à fadiga da borracha asfáltica

Nunes (2017) usou as propriedades reológicas como indicadores para o desempenho do pavimento. Em altas temperaturas, as propriedades reológicas foram relacionadas ao desempenho de *rutting* dos pavimentos. A reologia em temperaturas intermediárias teve impacto na fissuração por fadiga de pavimentos. As propriedades de baixa temperatura do ligante estão relacionadas ao craqueamento térmico de baixa temperatura do pavimento. Além disso, a temperatura é um fator vital que está correlacionado com a taxa de carregamento. Em temperaturas elevadas, ou taxas lentas de carregamento, o betume se torna um material viscoso.

Contudo, em temperaturas diminuídas ou taxas de carregamento mais altas, o betume torna-se um material altamente elástico. De fato, em temperaturas intermediárias, o betume tem duas características diferentes, ou seja, um sólido elástico e um fluido viscoso (PATRIOTA, 2018).

Rodrigues e Henkes (2016) investigaram os efeitos das propriedades reológicas da borracha fragmentada na fissuração por fadiga em temperaturas baixas e intermediárias usando diferentes métodos de cisalhamento. Os resultados mostraram que a mistura de alto cisalhamento tem mais efeito na melhoria em baixas temperaturas do que a mistura de baixo cisalhamento.

Nunes (2017) apresentou uma descrição do propósito e escopo do ensaio reômetro de cisalhamento dinâmico. O reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) foi utilizado para caracterizar o comportamento viscoelástico de materiais betuminosos em temperaturas de serviço intermediárias e altas. O comportamento tensão-deformação define a resposta dos materiais à carga. Os aglutinantes de asfalto mostram aspectos de comportamentos elásticos e viscosos; assim, eles são chamados de materiais viscoelásticos.

A rachadura é normalmente considerada um fenômeno de baixa temperatura, enquanto a deformação permanente é considerada o modo de falha predominante em temperaturas

elevadas. A trinca é categorizada principalmente em trinca térmica e trinca por fadiga associada à carga. Grandes mudanças de temperatura que ocorrem no pavimento geralmente resultam em fissuras térmicas (PINTO; PINTO, 2018).

Este tipo de falha ocorre quando a tensão de tração induzida termicamente, juntamente com as tensões causadas pelo tráfego, ultrapassa a resistência à tração dos materiais. A trinca geralmente, é caracterizada por rachaduras transversais ao longo da rodovia em determinados intervalos. A trinca por fadiga associada à carga é o fenômeno da fratura como resultado de tensões repetidas ou flutuantes causadas pelo carregamento do tráfego. As cargas de tráfego podem fazer com que a estrutura do pavimento se flexione e a deformação máxima de tração ocorrerá na base da camada betuminosa. Se esta estrutura for inadequada para as condições de carregamento impostas, a resistência à tração dos materiais será excedida e é provável que se iniciem rachaduras, que se manifestarão como rachaduras na superfície do pavimento (PINTO; PINTO, 2018).

Esta resistência das misturas betuminosas à fissuração depende essencialmente de sua resistência à tração e características de extensibilidade. Isso pode ser alcançado simplesmente aumentando o conteúdo de betume da mistura. No entanto, tal tentativa pode ter um efeito adverso na estabilidade da mistura (SPECHT, 2018).

4.10 Teste de misturas asfálticas

Diferentes testes e abordagens têm sido usados para avaliar as propriedades de misturas de concreto asfáltico. Várias propriedades do material podem ser obtidas a partir de testes mecânicos fundamentais que podem ser usados como parâmetros de entrada para modelos de desempenho de concreto asfáltico (PINTO; PINTO, 2018). Os principais aspectos, que podem ser caracterizados por meio do ensaio de tração indireta, são as propriedades elásticas resilientes, a fissuração por fadiga e as propriedades relacionadas à deformação permanente. A rigidez elástica das misturas asfálticas pode ser medida utilizando o ensaio de tração indireta (IDT).

A resistência à tração indireta de uma amostra é calculada a partir da carga máxima até a falha. De acordo com Rosa *et al.* (2018), o ensaio de tração indireta (IDT) tem sido amplamente utilizado no projeto estrutural de pavimentos flexíveis desde a década de 1960. Cordeiro (2019) recomendou o ensaio de tração indireta para a caracterização da mistura de concreto asfáltico.

A popularidade deste teste deve-se principalmente ao fato de que o teste pode ser feito usando amostra de marechal ou testemunhos de campo. Este teste é fácil, rápido e caracterizado como menos variável.

Existe um bom potencial na previsão de trincas por fadiga usando resultados de resistência à tração indireta. Foi realizado um estudo para avaliar o desempenho de misturas asfálticas modificadas de Polietileno (PE) com base nas propriedades físicas e mecânicas. As propriedades físicas foram avaliadas em termos de penetração e ponto de amolecimento.

As propriedades mecânicas foram avaliadas com base na resistência à tração indireta. O resultado mostrou que o PE aumentou as propriedades físicas e mecânicas do ligante modificado e das misturas.

Rosa *et al.* (2018) conduziram um teste de módulo de resiliência em misturas de concreto asfáltico não modificado e modificado usando espécime Marshall. Uma carga dinâmica de 68 kg foi aplicada e interrompida após 100 repetições de carga. A aplicação de carga e a deformação elástica horizontal foram usadas para calcular o valor do módulo de resiliência. Foram utilizadas duas temperaturas, 25 ° C e 40 ° C.

As misturas de asfalto modificadas com 10% de borracha fragmentada mostraram um módulo melhorado em comparação com as misturas de concreto asfáltico não modificado.

De acordo com Nunes (2017) o estudo investigou o comportamento à fadiga de diferentes misturas usando testes de viga de flexão de terceiro ponto de deformação controlada. Os testes de fadiga à flexão de deformação controlada indicaram que a incorporação de modificador de borracha fragmentada (CRM) nas misturas pode aumentar sua resistência à fadiga.

A magnitude da melhoria parece depender do grau e tipo de modificação da borracha. A análise elástica multicamada combinada com resultados de teste de fadiga também indicou o comportamento de fadiga aprimorado de misturas de CRM. No entanto, pesquisas de condição em seções convencionais e CRM não revelaram nenhum tipo de fissura longitudinal ou crocodilo, sugerindo desempenho de fadiga de campo semelhante para ambos os materiais.

4.11 Viabilidade financeira

Ao se comparar os custos unitários do Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ) modificado com borracha e do concreto asfáltico convencional, tem-se uma primeira impressão de que a utilização desta tecnologia gera um custo maior em relação ao material convencional.

Conforme estudo realizado pela DER/SP foi adotado um preço por metro cúbico de R\$ 541,99 para a execução de camada de rolamento com o CBUQ convencional, graduação C

(faixa III), e para o concreto asfáltico modificado com 15% em peso de borracha pelo método contínuo, é estipulado um preço unitário de R\$ 658,61 por metro cúbico de serviço executado. Uma diferença de R\$ 116,62 que corresponde aproximadamente 20,00% no preço unitário (SANCHES; GRANDINI; BAIERLE JUNIOR, 2019).

Porém, considerando-se o comparativo de desempenho e qualidade entre os dois materiais e a relação entre o custo e o benefício, pode-se chegar à conclusão de que uma obra de pavimentação com concreto asfáltico (CA) modificado por borracha é mais econômica que uma obra com a utilização do material convencional (PATRIOTA, 2018).

A começar pela redução na espessura do pavimento, tem-se uma grande diminuição no volume de material utilizado e conseqüente economia financeira. Por exemplo, em uma rodovia com 30 km de extensão e 7,0 metros de largura, a ser recuperada com uma espessura de 5,0 cm de CA convencional, utiliza-se um volume de 10.500,00 m³ de material (30.000,00 m x 7,00 m x 0,05 m) (TEIXEIRA; ARAÚJO, 2018). Quando se utiliza o asfalto- borracha está espessura pode ser reduzida em até 30%, diminuindo para 3,5 cm e consumindo um total de 7.350,00 m³ de concreto asfáltico (30.000,00 m x 7,00 m x 0,05 m).

Considerando-se os preços da DER/SP para execução dos serviços, tem-se os seguintes custos: obra com CBUQ convencional, graduação C (faixa III) do DER/SP: 10.500,00 m³ x R\$ 541,99 / m³ = R\$ 5.690.895,00 e obra utilizando CA modificado com 15% em peso de borracha (contínuo): 7.350,00 m³ x R\$ 658,61 / m³ = R\$ 4.840.783,50.

Portanto, com a redução da espessura, somente na diferença de quantidade produzida atinge-se uma economia de R\$ 850.111,50 (15%) com a substituição do asfalto convencional pelo modificado por borracha (SANCHES; GRANDINI; BAIERLE JUNIOR, 2019).

A viscosidade é usada para avaliar a trababilidade dos ligantes asfálticos sob temperaturas elevadas. A Figura 1 apresenta os resultados de viscosidade das amostras de LA e de LAB medidas a temperatura de 135°C e diferentes teores (5; 10 e 15% de borracha). Observou-se que o teor de borracha é o que mais influência na viscosidade do LAB, ocorrendo um aumento da viscosidade com o aumento do teor de borracha.

Atribui-se esse aumento à absorção dos óleos aromáticos do LA nas cadeias poliméricas da borracha e a presença de elastômeros. A Tabela 1 mostra o efeito o óleo extensor nos ligantes modificados pela borracha. A adição de OE em todos os teores (2,5; 4,5 e 6%) diminuiu a viscosidade do LA modificado com 20% de borracha. A viscosidade foi obtida a 12rpm e utilizou-se uma haste (spindle) n° 21 para o LA puro e 27 para o LAB.

Tabela 01. Viscosidade do LA e LAB com 20% de borracha em diferentes teores de OE nas temperaturas 135, 150 e 175°C.

Temperatura (°C)	135	150	175
Viscosidade (cP) do LA	485	235	88,5
Viscosidade (cP) do LAB com 0% OE	47.016	14.844	6.229
Viscosidade (cP) do LAB com 2,5% OE	27.989	11.554	5.233
Viscosidade (cP) do LAB com 4,5% OE	21.650	9.325	3.937
Viscosidade (cP) do LAB com 6% OE	20.483	9.196	3.365

Fonte: Adaptado de Sanches et al., 2019.

Outros fatores como a diminuição no tempo de execução podem gerar mais economias ao processo executivo. Considerando o mesmo exemplo e o peso específico das misturas igual a 2,4 toneladas por metro cúbico, a quantidade de material em massa a ser utilizada seria de 25.200 toneladas para o concreto com ligante convencional e de 17.640 toneladas para o asfalto-borracha (SPECHT, 2018).

Utilizando-se uma usina de asfalto com capacidade produtiva de 9.000 toneladas por mês, tem-se um prazo aproximado de quase três meses para aplicação do CBUQ com ligante convencional e pouco menos de dois meses caso a pavimentação seja realizada com asfalto-borracha e considerada a redução de 30% na espessura. Obtém-se assim uma economia de um mês de trabalho em que não serão utilizadas as instalações de obra, equipamentos, mão de obra etc., reduzindo estes e outros custos fixos.

5 CONCLUSÃO

Baseadas nas informações apresentadas e contidas neste trabalho, podem ser estabelecidas algumas conclusões. A adição da borracha de pneus inservíveis, triturada e moída, no cimento asfáltico utilizado para produção de concreto asfáltico traz diversos benefícios técnicos ao material e de economia para a obra que se utiliza desta tecnologia.

Isto se deve à modificação das propriedades do ligante asfáltico causada pela borracha dos pneus, tornando o CAUQ com asfalto-borracha um material mais flexível, com maior ductilidade e resistente às severas condições e variações de temperaturas. A utilização deste processo proporciona técnica e economicamente as seguintes vantagens: diminuição de trincas, principalmente por fadiga, tornando o pavimento mais resistente ao envelhecimento e proporcionando um aumento de sua vida útil, menor deformação permanente, evitando o aparecimento de trilhas de rodas;

Permite a redução nas espessuras das camadas asfálticas dos pavimentos, usadas como camada de rolamento ou de ligação e recapeamento sobre pavimentos já deteriorados e trincados. Redução dos níveis de ruídos causados pelo contato entre pneu e pavimento e aumento da aderência melhorando a eficiência de frenagem dos veículos e trazendo maior segurança aos usuários;

Apesar de ser um material com maior custo, se comparado ao convencional, permite algumas economias de materiais e prazos, além de uma menor necessidade de manutenção e reparos ao longo do tempo, tendo uma relação custo-benefício muito vantajosa.

Quanto ao método seco, observa-se uma menor utilização devido ao menor controle de produção e qualidade, por se tratar de um processo realizado no próprio canteiro da obra. Possui menos vantagens em relação ao método úmido, sendo as principais a redução de ruídos e trincas ocasionadas por fadiga e variações térmicas devido à maior flexibilidade e resistência à fadiga.

Por ser um material que deve ser utilizado somente em misturas a quente e necessita de altas temperaturas para usinagem, superiores às adotadas para o CAP, existe a premissa de que esta técnica pode ser altamente poluente ao meio ambiente, apesar de resolver o problema de destinação e disposição final dos pneus usados. No entanto, há exigências determinadas pela legislação e pelos órgãos ambientais a serem seguidas para a implantação de tais processos, como a implantação de equipamentos para controle da poluição, além da fiscalização por parte dos órgãos competentes.

No comparativo financeiro apresentado entre a utilização do asfalto-borracha e do asfalto convencional, de forma didática, foi reduzida a espessura em 30% para utilização do

asfalto borracha, porém todo e qualquer redimensionamento deve levar em conta a deformabilidade da estrutura, o tipo de tráfego, o clima e o tipo de mistura que será utilizada, podendo variar de acordo com estas condições. As reduções nos custos não devem se restringir apenas às modificações do projeto, mas também a estas variáveis e outras como disponibilidade de estrutura, equipamentos e mão de obra para produção e aplicação do material.

REFERÊNCIAS

- ABNT, **NBR 10004**. Resíduos sólidos - classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.
- BARBOSA, R. C. **Análise de misturas asfálticas modificadas com borracha de pneus pelo processo seco**. 2016. 63 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2016.
- BRASIL. Resolução CONAMA n o 416, de 30 de setembro de 2009. **Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 15 set. 2021.
- CANHADA, J. C. S; ALTRAN, D. A; ISHIKI, H. M; FIDELIS, G. N. S; DOS SANTOS, R. J. Caracterização física e morfológica de compósitos de concreto com resíduos de borracha vulcanizada. **Colloquium Exactarum**, v. 9, n. 3, p.65–75, 2017.
- CATAPRETA, Cícero Antônio; ZAMBIASI, Clarissa Ana; LOYOLA, Letícia Aparecida de Jesus. **Uso da borracha de pneus na pavimentação como uma alternativa ecologicamente viável**. VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Campina Grande/PB – 21 a 24/11/2016.
- CEARÁ. GOVERNO DO ESTADO. Lei nº 16.032, de 20 de junho de 2016. **Institui a política estadual de Resíduos Sólidos no âmbito do Estado do Ceará**. PALÁCIO DA ABOLIÇÃO, DO GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, em Fortaleza, 20 de junho de 2016.
- CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. **Manual de dosagem de concreto asfáltico**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- COLAVITE, Alessandro Serrano; KONISHI, Fabio. A matriz do transporte no Brasil: uma análise comparativa para a competitividade. **Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, v. 12, p. 28, 2015.
- CORDEIRO, W. R. **Comportamento de Concretos Asfálticos Projetados com Cimento Asfáltico Modificado por Borracha de Pneus**. 2019. 253 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2019.
- CORDEIRO, W. R.; PINTO, S. **Algumas Considerações Sobre Asfalto Modificado por Borracha de Pneus**. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- DE HOLANDA, É. P. T.; SOARES, A. P. F.; DE OLIVEIRA, D. J. T. M.; VASCONCELOS, L. T.; SANTOS, H. W. M. Incorporação da borracha para pavimentação asfáltica. **Caderno De Graduação**, v. 3, n. 3, p. 133, 2017.
- DER/SP - **Departamento De Estradas De Rodagem Do Estado De São Paulo**. (abril de 2014). Especificação Técnica ET-DE-P00/027 Rev. A – Concreto Asfáltico. São Paulo.
- DIAS, Alvaro José; PAULA, Aline Brito de; FRANCO NETO, Geraldo Gouveia; BERNADES, Matheus Sousa. **O Uso de Borracha em Ligantes Asfálticos para Pavimentação de Rodovias no estado de Minas Gerais**. 8º EnTec – Encontro de Tecnologia da UNIUBE / 28 a 30 de outubro de 2014.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 150/2010 ES – Pavimentação asfáltica – Lama asfáltica**, Rio de Janeiro, 2010.

FREITAS, Henrique et al. O método de pesquisa survey. **Revista de Administração**; ão da Universidade de São Paulo, v. 35, n. 3, 2000.

GRANJEIRO, R.V.T., et al., Avaliação do potencial de uso do óleo de fritura dos restaurantes da Universidade Federal de Pernambuco para produção de biodiesel, **Arrudea - A revista do Jardim Botânico do Recife**, 3: 41-50 , 2017.

MONTEIRO JUNIOR, R.; DOS SANTOS, M.; FREITAS, M.; LAVOR, D. The technical feasibility of the use of rubber chips in the production of permeable concrete for urban paving: case study. **Itegam-Jetia**, v. 5, n. 19, p. 184-191, 2019.

NUNES, L. C. **Fadiga de Misturas Asfálticas Descontínuas com Asfalto Borracha**. 2017. 142 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília. Brasília, 2017.

PATRIOTA, M. B. **Análise laboratorial de concreto betuminoso usinado a quente modificado com adição de borracha reciclada de pneus, processo seco**. 2018. 149 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2018.

PINTO, S.; PINTO, I. E. **Pavimentação asfáltica: conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos**. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

RAMOS, Y.S.; PESSOA, Y.S.R.Q.; RAMOS, Y.S.; ARAÚJO NETTO, F.B.; PESSOA C.E.Q., Vulnerabilidade no manejo dos resíduos de serviços de saúde de João Pessoa (PB, Brasil). **Ciênc Saúde Coletiva**. 2011; 16(8):3553-60.

RODRIGUES, C. M.; HENKES, J. A. Reciclagem de pneus: atitude ambiental aliada à estratégia econômica. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 448- 473, 2016.

ROMANELLI. **Asfalto borracha na pavimentação de rodovias**. Disponível em: < <https://www.romanelli.com.br/pt/noticias/asfalto-borracha-na-pavimentacao-de-rodovias>>. Acesso em: 12 out. 2021.

ROSA, A. P. G; SANTOS, R. A.; CRISPIM, F. A.; RIVA, R. D. D. Análise comparativa entre asfalto modificado com borracha reciclada de pneus e asfalto modificado com polímeros. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 14, n. 22, p.31-38, 2018.

SANCHES, F. G.; GRANDINI, F. H. B.; BAIERLE JUNIOR, O. **Avaliação da viabilidade financeira de projetos com utilização do asfalto-borracha em relação ao asfalto convencional**. 2019. 73 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

SANTOS, A.A. **Educação ambiental e o gerenciamento dos resíduos sólidos do refeitório do IFTEM-ITUIUTABA. Projeto de minimização dos resíduos sólidos**. Uberaba-MG, 2016.

SILVA, C. A.; ANDREOLI, C. V. Compostagem como alternativa a disposição final dos resíduos sólidos gerados na CEASA Curitiba/PR. **Revista Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia** - Espírito Santo do Pinhal, v. 7, n. 2, p.27-40, 2010.

SOUZA, M.F.; FAGUNDES, A.K.; MILANI, I.C.B.; NEBEL, A.L.C.; TAVARES, V.E.Q.; SUZUKI, L.E.A.S.; COLLARES, G.L. **Caracterização dos Resíduos Sólidos em um Restaurante Universitário**. Rio Grande do Sul, 2011.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação da borracha reciclada de Pneus**. 2018. 279 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

TEIXEIRA, L. H. B.; ARAÚJO, O. C. C. **Estudo das Vantagens do Asfalto-borracha em Relação ao Asfalto Convencional**. 2018. 46 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UniEvangélica. Anápolis, 2018.

ZATARIN, A. P. M. Viabilidade da Pavimentação com Asfalto borracha. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**. Florianópolis, v. 5, n. 2, p.649-674, 2017.