



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias

Carlos Anderson Gomes Fiori

Pneus inservíveis: reciclagem e uso na pavimentação asfáltica

Rio de Janeiro

2022

Carlos Anderson Gomes Fiori

Pneus inservíveis: reciclagem e uso na pavimentação asfáltica

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Alex da Silva Sirqueira

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/CZO

F518 Fiore, Carlos Anderson Gomes

Pneus inservíveis: reciclagem e uso nas pavimentações asfálticas/Carlos Anderson Gomes
Fiore- 2022.
70 f.

Orientador: Alex Sirqueira

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Tecnologia de Materiais.

1. Ciência e Tecnologia de Materiais – Teses. 2. Pneus – Teses. 3. Reciclagem - Teses. 4.
Meio ambiente – Teses. 5. Asfalto modificado – Teses. I. Sirqueira, Alex . II. Universidade
do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Ciências Exatas e Engenharia. III. Título.

CDU 620

Bibliotecária: Rosana Maria dos Passos – CRB 7 4908

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Carlos Anderson Gomes Fiore

Pneus inservíveis: reciclagem e uso na pavimentação asfáltica

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 07 de dezembro de 2022.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Prof. Dr. Alex da Silva Sirqueira (Orientador)
Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias – UERJ

Prof^ª. Dra. Patricia Reis Pinto
Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias – UERJ

Prof^ª. Dra. Elaine Cristina Lopes Pereira
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2022

AGRADECIMENTOS

A Deus pela dádiva da vida e por me permitir realizar tantos sonhos nesta existência.
Obrigado por me permitir errar, aprender e crescer...

Ao meu orientador, professor Alex Sirqueira, pela competência, profissionalismo e dedicação.

Aos membros da banca examinadora, que tão gentilmente aceitaram participar e colaborar com esta dissertação.

Aos meus pais José e Heloísa, pelo amor, carinho e ensinamentos...

Aos meus irmãos Eduardo e Elisângela por sempre me apoiarem.

A minha esposa, Josimeri, por sempre estar ao meu lado, confiando, incentivando...

Se vives de acordo com as leis da natureza, nunca serás pobre;
se vives de acordo com as opiniões alheias, nunca serás rico

Seneca

RESUMO

FIGLIORE, Carlos Anderson Gomes. **Pneus inservíveis: reciclagem e uso nas pavimentações asfálticas.** 2022. 41f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Faculdade de Ciências Exatas e Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2022.

A geração de resíduos pelo homem é uma problemática que desafia a sociedade. Uma melhor destinação dos resíduos deve ser proposta por uma política de recolhimento, que além da destinação correta, seja capaz de contribuir para a consciência da população do ponto de vista da sustentabilidade tanto social, quanto ambiental, por meio de ações que promovam a redução dos resíduos produzidos, a reutilização e reciclagem de materiais. O potencial contaminante dos pneus, sobretudo por seu descarte inadequado é um fator de destaque quanto à poluição. Em contrapartida, em sua maioria os pavimentos no Brasil são de baixa qualidade, tanto no que se refere a conforto ao rolamento, quanto a sua durabilidade. Anualmente bilhões de reais são investidos para a manutenção das rodovias brasileiras. Há necessidade de se buscar novas técnicas que minimizem os problemas encontrados com o descarte incorreto de materiais potencialmente poluentes, aliada ao desenvolvimento de um melhor pavimento asfáltico que proporcione maior durabilidade, trafegabilidade, segurança e menor custo manutenção. Este trabalho tem como objetivo fazer um levantamento bibliográfico que possa contribuir para indicar caminhos de orientação para uma possível solução desse problema. O reaproveitamento do pó da borracha extraído de pneus em desuso para fins asfáltico já é praticado há muitos anos em outros países, aumentando a durabilidade do pavimento e mate 40%. No Brasil, ainda não é uma prática, mas vem se popularizando entre as concessionárias das rodovias o que proporciona uma destinação sustentável para esse material. O descontrole na eliminação do pneu acaba degradando o meio ambiente, se acumulando nas encostas das rodovias, rios, terrenos baldios e diversos lugares, resultando em problemas para a sociedade como a proliferação de insetos. Por se tratar de um material polimérico termo fixo o processo de decomposição é bastante lento, o reaproveitamento destes na pavimentação é uma saída inteligente para sua utilização. Apesar de esta técnica ter elevado custo inicial de implantação quando comparado ao asfalto convencional, o que é um obstáculo para a sua implementação, o asfalto modificado com borracha apresenta maior resistência, menor custo manutenção e contribui com a sustentabilidade do planeta, o que a longo prazo é muito importante e essencial à vida. É considerado promissor o emprego de borracha pós consumida oriunda de pneus inservíveis. A necessidade de políticas públicas que adotem medidas para a utilização da adição do pó de pneus (pós consumidos) na confecção de asfaltos é premente e os seus benefícios são inúmeros.

Palavras-chave: Pneus. Sustentabilidade e Reciclagem. Asfalto Modificado. Benefícios.

ABSTRACT

FIORE, Carlos Anderson Gomes. **Waste tires: recycling and use in asphalt paving**. 2022. 41f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Faculdade de Ciências Exatas e Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2022.

The generation of waste by man is a problem that challenges society. Better waste disposal must be proposed by a collection policy, which in addition to correct disposal, is capable of contributing to the population's awareness from the point of view of both social and environmental sustainability, through actions that promote the reduction of waste. waste produced, reuse and recycling of materials. The contaminating potential of tires, especially due to their inadequate disposal, is a prominent factor in terms of pollution. On the other hand, the majority of pavements in Brazil are of low quality, both in terms of rolling comfort and durability. Annually, billions of reais are invested in the maintenance of Brazilian highways. There is a need to seek new techniques that minimize the problems encountered with the incorrect disposal of potentially polluting materials, combined with the development of better asphalt pavement that provides greater durability, trafficability, safety and lower maintenance costs. This work aims to carry out a bibliographical survey that can help to indicate paths towards a possible solution to this problem. The reuse of rubber powder extracted from disused tires for asphalt purposes has been practiced for many years in other countries, increasing the durability of the pavement and matte by 40%. In Brazil, it is not yet a practice, but it is becoming popular among highway concessionaires, which provides a sustainable destination for this material. Lack of control in tire disposal ends up degrading the environment, accumulating on the slopes of highways, rivers, vacant lots and various places, resulting in problems for society such as the proliferation of insects. As it is a thermo-fixed polymeric material, the decomposition process is quite slow, reusing it in paving is an intelligent solution for its use. Although this technique has a high initial implementation cost when compared to conventional asphalt, which is an obstacle to its implementation, asphalt modified with rubber has greater resistance, lower maintenance costs and contributes to the sustainability of the planet, which lengthens the term It is very important and essential to life. The use of post-consumed rubber from scrap tires is considered promising. The need for public policies that adopt measures to use the addition of tire dust (consumed powders) in the manufacture of asphalt is urgent and its benefits are countless.

Keywords: Tires. Sustainability and Recycling. Modified Asphalt. Benefits.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 1 – | Volume de pneus em de sus o no Brasil..... | 11 |
| Figura 2 – | Composição da matriz Detran esporte de carga no Brasil–CNT - (% por modo) – 2019..... | 13 |
| Figura 3 – | Pilares da sustentabilidade..... | 16 |
| Figura 4 – | Composição de um pneu..... | 18 |
| Figura 5 – | Degradação de pneus..... | 19 |
| Figura 6 – | Fonte de proliferação de mosquitos..... | 20 |
| Figura 7 – | Gastos para drenagem dos rios..... | 20 |
| Figura 8 – | Ciclo dos pneus in servíveis..... | 21 |
| Figura 9 – | Processo seco para a modificação das misturas asfálticas com borracha..... | 24 |
| Figura 10 – | Processo úmi do para fabricação do asfalto borracha..... | 25 |
| Figura 11 – | Asfalto borrachaBR–116..... | 26 |
| Figura 12 – | Ecovia Curitiba ao litoral do Paraná..... | 27 |
| Figura 13 – | Custo de execução..... | 32 |
| Figura 14 - | Custo de manutenção..... | 33 |
| Figura 15 – | Asfalto convencional e asfalto borracha..... | 34 |
| Figura 16 - | Guia produto técnico de dissertação “Das rodas às pistas”..... | 35 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabela1 – | Especificações dos cimentos asfálticos de petróleo modificados por borracha moída de pneus – asfaltos especificações dos cimentos asfálticos de petróleo modificados por borracha moída de pneus asfaltos..... | 29 |
| Tabela2 – | Especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP) classificação por penetração..... | 30 |
| Tabela3 – | Especificações dos cimentos asfálticos de petróleo modificados por polímeros elastoméricos..... | 31 |
| Tabela4 – | Referencial de preços..... | 33 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|--|
| ANP | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis |
| ANIP | Agência Nacional da Indústria de Pneumáticos |
| CAP | Cimento Asfáltico de Petróleo |
| CNT | Confederação Nacional de Transportes |
| CAUQ | Concreto Asfáltico Usinado a Quente |
| CBUQ | Concreto Betuminoso Usinado a Quente |
| IBP | Instituto Brasileiro de Petróleo |
| PMF | Pré-Misturado a Frio |
| PNRS | Política Nacional de Resíduos Sólidos |
| SETOP | Secretaria de Estado de Transportes e Obras Públicas de Minas Gerais |

SUMÁRIO

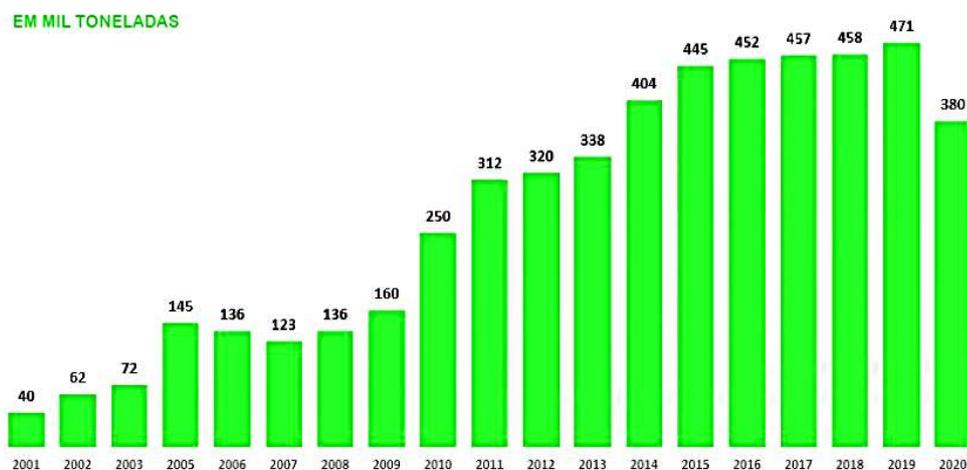
| | |
|---|----|
| INTRODUÇÃO | 11 |
| 2 OBJETIVOS | 14 |
| 2.1 Objetivo Geral | 14 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 14 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 3.1 Sustentabilidade | 15 |
| 3.2 Composição dos pneus | 17 |
| 3.3 Danos causados ao meio ambiente com o descarte inadequado de pneus | 19 |
| 3.3.1 Degradação | 19 |
| 3.3.2 Fonte de doenças | 19 |
| 3.3.3 Gastos desnecessários | 20 |
| 3.3 Alternativas para o reuso do pneu inservível | 21 |
| 3.4 Asfalto | 22 |
| 3.5 Polímeros | 23 |
| 3.6 Asfalto borracha | 25 |
| 4 METODOLOGIA | 28 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 29 |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS | 36 |
| REFERÊNCIAS | 37 |

INTRODUÇÃO

O avanço urbano tem contribuído para o aumento da geração de resíduos sólidos, o que demanda investimentos em pesquisas de inovações tecnológicas com a finalidade de transformar os resíduos descartados em novos produtos, reduzindo, assim, o impacto ambiental causado pelo descarte inadequado (GOUVEIA, 2012).

Para Strauch e Albuquerque (2008), as raízes do problema dos resíduos surgem em paralelo com o desenvolvimento econômico e nos atuais padrões sociais de consumo e produção. Sendo o Brasil o 5º produtor mundial na categoria de pneus para caminhões e ônibus, e o 7º para automóveis, e mesmo com a pandemia da COVID-19, em 2020, a indústria vendeu mais de 53,8 milhões de pneus (reposição e equipamentos originais). Buscando atender a responsabilidade ambiental do setor, em 2019 foram destinadas de forma ambientalmente correta mais de 471 mil toneladas de pneus inservíveis, ao mesmo passo que o setor consegue ajudar o Brasil a crescer economicamente, também cumpre suas responsabilidades ambientais desde 1999, se tornando atualmente uma referência mundial na logística reversa, contribuindo assim para o crescimento sustentável do setor e do Brasil. A Figura 1 apresenta um gráfico do volume de pneus em desuso no Brasil, destacando o descarte de forma ambientalmente correta de 380 mil toneladas de pneus inservíveis em 2020, realizada pelos fabricantes nacionais de pneus.

Figura 1 –Gráfico demonstrando o volume de pneus em desuso no Brasil dos anos de 2001 a 2020.



Fonte: RECICLANIP (2020).

Observou-se também que em 2020 foram recolhidos o volume de 9,5 vezes maior tomando como referência o ano de 2001. Essa quantidade de pneus recolhidos é obtida a partir do mapeamento da quantidade de pneus vendidos para reposição.

Devido à ausência da atuação dos comerciantes e distribuidores, conforme determina a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em 1960 surge a Agência Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) que representa a indústria de pneus e câmaras de ar instalada no Brasil, composta por 11 empresas associadas, a Bridgestone, Continental, Dunlop (Sumitomo), Goodyear, Michelin, Maggion, Pirelli, Prometeon, Rinaldi, Titan e Tortuga. Esta representação se faz presente nas mais diversas esferas no Brasil e também no exterior. Diversos temas que envolvem o pneu como tecnologia, segurança e meio ambiente assim como o próprio setor em temas como competitividade, comércio exterior, temas tributários entre outros compõe o nosso dia a dia, a ANIP está em constante busca de soluções cada vez mais sustentáveis.

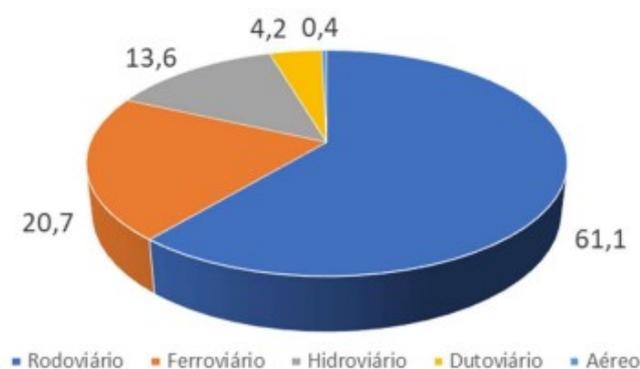
A deterioração dos pneus é um dos grandes problemas ambientais especialmente por conta de seu elevado tempo de decomposição (400 a 800 anos). Na década de 70, na capital da Suécia, Estocolmo, durante a Conferência das Nações Unidas sobre o Homem e o Meio Ambiente, levantaram-se contradições ligadas ao desenvolvimento e ao meio ambiente. Um estudo, solicitado por um grupo de empresários junto ao renomado *Massachusetts Institute of Technology* (EUA), constatou que havia uma série de impactos ambientais de âmbito internacional, provocados pelo modelo de desenvolvimento capitalista instituído (FREITAS, 2020).

Em contra partida existe uma crescente demanda nas rodovias brasileiras, por um melhor asfalto, aliada a necessidade de se inovar para ser sustentável, faz-se necessário cada vez mais buscar soluções para reduzir os problemas ambientais e aumentar a vida útil das rodovias. Com a busca de melhoria na qualidade de construção do asfalto e implementação de materiais descartáveis e inutilizáveis podemos atender essa demanda. Um dos elementos essenciais para o desenvolvimento de qualquer sociedade industrial é a existência de uma infraestrutura adequada para a sustentabilidade socioeconômica de sua população, assim aborda (PIMENTA e OLIVEIRA, 2001).

As estradas acompanham o progresso do homem, suprem a sua necessidade de avançar fronteiras, trilhar caminhos, expandir territórios. Para tanto, faz-se

necessário investir na infraestrutura de transportes de forma a garantir o bom funcionamento, conforto e segurança dos usuários e escoamento de produtos, e serviços. No Brasil, é notória a predominância do modal rodoviário em relação aos demais tipos de transporte, quais sejam, como demonstra a figura abaixo referente à distribuição do transporte de carga no ano de 2019 (CNT, 2019).

Figura 2 - Gráfico comparativo da composição da matriz de transporte de carga no Brasil – CNT (% por modo) no ano de 2019.



Fonte: CNT 2019.

Levantamentos recorrentes da Confederação Nacional do Transporte – CNT têm considerado a grande maioria dos pavimentos do Brasil de baixo conforto ao rolamento, incluindo muitos trechos concessionados da malha federal. Estima-se de 1 a 2 bilhões de reais, por ano, para manutenção das rodovias federais, acredita-se que seriam necessários R\$ 10 bilhões para recuperação de toda a malha viária federal, es que surge utilização da borracha obtida de pneus inservíveis na mistura da liga asfáltica, como forma inovadora de se melhorar o pavimento das estradas brasileiras e mundiais, sendo ambientalmente corretas e gerando menor custo de manutenção.

Buscando atender as demandas de destinação de pneus inservíveis, destacando uma alternativa de inserção desse material ao polímero ligante na produção de massa asfáltica utilizada na pavimentação de rodovias, este estudo realizou uma revisão de literatura a fim de demonstrar que o asfalto com adição de borracha apresenta maior aderência e flexibilidade, destacando também o porquê deste método ser pouco aplicado no Brasil.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo demonstrar, através de uma pesquisa bibliográfica, como a inovação através da reutilização de pneus pode melhorar não só a economia, mas também a reciclagem dos mesmos, promovendo o descarte correto ou reaproveitamento do pneu descartado, sensibilizando quanto aos benefícios ao meio ambiente.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Demonstrar a utilização de técnicas na implantação da pavimentação asfalto borracha;
- Destacar as reduções no custo de manutenção da pavimentação e dos veículos que trafegam por vias com asfalto borracha;
- Apresentar a diferença entre o asfalto convencional e o asfalto borracha;
- Evidenciar as melhorias para o meio ambiente e na pavimentação asfáltica;
- Desenvolver como produto técnico um guia para sensibilizar quanto a importância do descarte correto de pneus, destacando o emprego desse material na produção de asfalto borracha, tendo como público alvo usuários de pneus, proprietários e administradores de retíficas e borracharias.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados os tópicos pesquisados como referencial teórico, visando fundamentar o desenvolvimento da pesquisa sobre o tema sustentabilidade de modo a proporcionar uma visão panorâmica do assunto, além de apresentar os pilares da sustentabilidade via desenvolvimento econômico, ambiental e social, descrevendo os incentivos, condutas adotadas e o marco regulatório.

3.1 Sustentabilidade

Os atributos ambientais tornaram-se um dos diferenciadores na escolha de produtos em decorrência da maior consciência ecológica dos consumidores (BIAZIN e GODOY, 2000).

A sustentabilidade é considerada uma das tendências iminentes para as empresas que querem competir no mercado globalizado. A sociedade, a economia e o meio ambiente pedem abordagens diferenciadas, nesse sentido vem “a adoção de uma abordagem para gerenciar todo o ciclo de vida de um produto”, ou Gestão do Ciclo de Vida de Produtos (*Product LifeCycle Management* - PLM), que permite acompanhar novos produtos desde a geração da ideia, até retirada do mercado e destino final (ROZENFELD *et al.*, 2006).

Um produto ou categorias de serviços são avaliados através de uma abordagem de ciclo de vida para garantir que todos os impactos ambientais significativos são considerados na elaboração de uma norma, desde a extração de matérias-primas até a fabricação e o uso e descarte. Essa avaliação envolve aprofundado estado da arte, avaliações científicas utilizando metodologias internacionalmente aceitas. (RIBEIRO, *et al.*, 2020).

Kinlaw (1997) declara que o lema da década de 90 era o desempenho de qualidade e sugeriu que na década seguinte seria desempenho sustentável orientando que as organizações deveriam conduzir seus negócios de forma a continuar existindo no futuro. Sendo o primeiro objetivo das organizações permanecer no mercado, então o desempenho sustentável descreveria o que é necessário para permanecer em uma nova era ambiental. Se o desempenho de qualidade tornou-se o lema desta década, desempenho sustentável (ou algo similar) iria se tornar o lema da próxima década. De fato, o desenvolvimento sustentável tornou-se uma ideologia, uma ética, indicando valores que devem ser seguidos pela

sociedade, considerando as necessidades das pessoas como o direito a uma vida digna, como mencionado por Tachizawa e Pozo (2007).

“O comportamento dos consumidores está criando novas interações com as empresas no mundo inteiro e delineando os contornos de uma nova ordem econômica. Já é natural [...] os direitos dos consumidores em tudo o que se faz para regular as relações econômicas. Essa tendência, que projeta o perfil da economia globalizada para as próximas décadas, passa a exigir inovadores meios de comunicação das ações empresariais junto à comunidade. É o caso do balanço social que surge como um instrumento de evidenciação das ações empresariais, inserido em um cenário de transparência e disseminação de informações junto aos diferentes públicos da empresa, compatibilizando informações relativas ao crescimento econômico e de evolução da sustentabilidade empresarial” (TACHIZAWA e POZO, 2007, p. 37).

O desenvolvimento sustentável supõe que a natureza tem limites, que o progresso humano não pode continuar de forma ilimitada e incontrolável, e que deve haver uma responsabilidade coletiva pelo uso dos recursos naturais (BRAGA, 2004, p. 72).

Mencionados pela primeira vez durante a Cúpula Mundial sobre o Desenvolvimento Sustentável da ONU, na Declaração de Joanesburgo, em 2010, os pilares da sustentabilidade, demonstrados na Figura 3, necessitam estar em completo equilíbrio para que não ocorra o que o mundo vivencia nos dias de hoje pobreza, desigualdades e o aquecimento global (SENADO FEDERAL, 2012; LAGO, 2006):

Figura 3 – Imagem demonstrando os pilares da sustentabilidade mencionados pela primeira vez na Declaração de Joanesburgo, em 2010.



Fonte: FONTOURA; MERINO; FIGUEIREDO, 2018.

A Lei Federal 6.938/1981 fixou a Política Nacional do Meio Ambiente, estabelecendo o seguinte em seu “Art. 3º - Para os fins previstos nesta Lei, entende-se por” (BRASIL, 1981):

“I - meio ambiente, o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas; II - degradação da qualidade ambiental, a alteração adversa das características do meio ambiente; III - poluição, a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente: a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população; b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; c) afetem desfavoravelmente a biota; d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos; IV - poluidor, a pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, responsável, direta ou indiretamente, por atividade causadora de degradação ambiental; V - recursos ambientais: a atmosfera, as águas interiores, superficiais e subterrâneas, os estuários, o mar territorial, o solo, o subsolo, os elementos da biosfera, a fauna e a flora (Redação dada pela Lei nº 7.804, de 1989)”.

Tendo por objetivo eliminar as causas da degradação ambiental, a Política Nacional do Meio Ambiente, através de ações preventivas, ou que minimizem a geração dos poluentes na fonte, promove a redução do uso de materiais “virgens” e energias para uma quantidade suficiente à produção (BORGES, 1999). Dessa forma, é pertinente a preocupação latente com o destino dos pneus inservíveis, pois descartando esses pneus de forma adequada diminuimos os desequilíbrios ambientais, sociais e econômicos.

3.2 Composição dos pneus

Os pneus são compostos por borracha natural que é extraída de uma árvore chamada Seringueira, que gera um líquido viscoso chamado látex. A partir do látex, é possível formar a borracha. A borracha após ser utilizada e descartada, pode ser reciclada para uso em diversos produtos, como na composição de asfalto. Existem dois tipos de reciclagem da borracha, separando o que pode ser utilizado do que é de fato descartado, são eles: reciclagem mecânica e criogênica (OLIVEDO, 2018; FREITAS, 2020).

Ainda de acordo com Olivedo (2018), a reciclagem mecânica é formada por um processo de corte e trituração da borracha à uma temperatura ambiente (a depender do local). O atrito gerado aumenta a temperatura da borracha. O processo de corte e trituração pode ser feito em granuladores onde as partículas vão de 2,0mm a 9,5mm. Também pode ocorrer o processo em moinhos, no qual utiliza tolos

giratórios que atuam em velocidades distintas e as partículas variam de 0,425mm e 4,75mm.

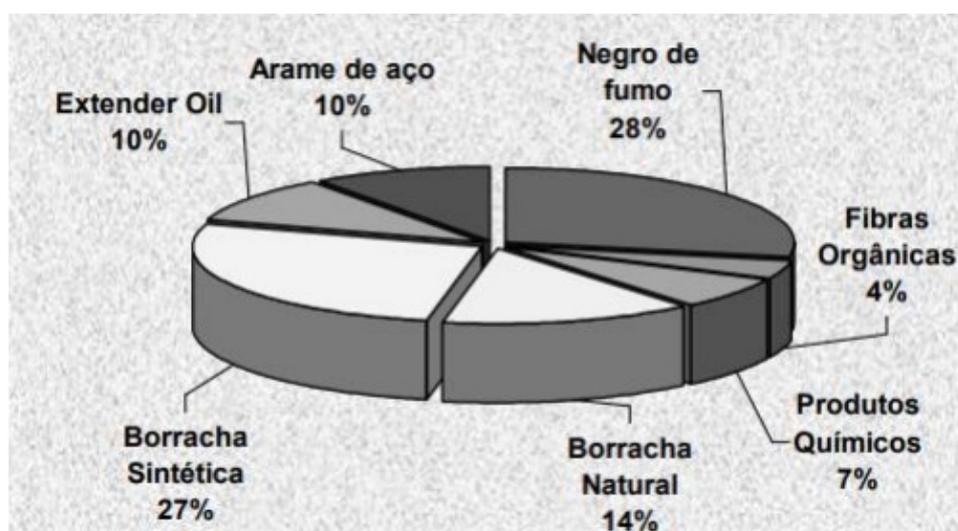
Já no processo criogênica, a borracha é banhada com nitrogênio líquido em temperaturas extremas que variam de -90° a - 196°C. Ao atingir a temperatura de 62°C, a borracha inicia seu aspecto granular, ficando toda quebradiça, podendo ser separada. O tamanho das partículas varia de 0,6 e 6,00mm.

Segundo Pinto e Pinto (2019), um pneu típico de veículos de passeio possui em sua composição:

- trinta diferentes tipos de borracha sintética;
- borracha natural;
- oito tipos de carbono preto (negro de fumo);
- aço para o cinturão;
- poliéster e nylon;
- arame de aço;
- quarenta tipos diferentes de componentes químicos, ceras, óleos, pigmentos, antioxidantes, inibidores de raios ultravioletas etc.

Na Figura 4 é possível constatar o percentual de cada componente estrutural de um pneu.

Figura 4 – Composição, em percentual, de um pneu de veículo de passeio.



Fonte: (BNDES, 1998).

Sua reutilização na fabricação de outros produtos atende a proposta de sustentabilidade por minimizar os danos ambientais e socioeconômicos, por evitar a

utilização de matéria prima virgem, reinserindo no ciclo produtivo um resíduo anteriormente sem valor econômico.

3.3 Danos causados ao meio ambiente com o descarte inadequado de pneus

3.3.1 Degradação

O descarte de pneus no meio ambiente é um grande problema ambiental especialmente por conta da decomposição do pneu que acaba causando contaminação do solo e por consequência deteriorado o meio ambiente. Além disso, quando estão expostos à luz solar e às chuvas, os pneus começam a gerar líquidos e gases oriundos do processo degradativo, contaminando ecossistemas inteiros e a atmosfera. Todos os anos milhões de pneus são descartados no planeta, seu período de degradação pode compreender entre 400 e 800 anos, na Figura 5 apresenta-se um exemplo de um pneu se degradando ao ar livre (PARRA; NASCIMENTO; FERREIRA, 2010; FREITAS, 2020).

Figura 5 - Degradação de pneus ao ar livre.



Fonte: SILVA, 2020.

3.3.2 Fonte de doenças

Pneus descartados incorretamente também são fontes para diversas doenças como a dengue, malária e febre amarela são algumas das enfermidades que advêm do acúmulo de água no interior desses pneus tornando fonte de proliferação dos mosquitos causadores dessas doenças, com a contaminação do solo, atingimos até mesmo os animais que se alimentam de recursos naturais contaminados pela

eliminação de resíduos químicos que fazem parte da consistência dos pneus. Na Figura 6 há uma ilustração demonstrando a proliferação de mosquitos (SILVA, 2020).

Figura 6 – Fonte de proliferação de mosquitos pelo acúmulo de água em pneus.



Fonte:Chikungunya Vetores e Ilustrações de Stock – iStock istockphoto.com

3.3.3 Gastos desnecessários

O poder público também sofre com o descarte de pneus no meio ambiente, uma vez que é preciso investir em gastos desnecessários na retirada constante desses materiais em rios, lagos, mares e solo. E ainda sustentar o serviço público de saúde são alguns dos problemas financeiros no cofre público, que se tornam reais. A Figura 7 demonstra o trabalho de drenagem que é realizado em rios e córregos (PARRA; NASCIMENTO; FERREIRA, 2010).

Figura 7 – Trabalho de drenagem de um rio para retirada de resíduos.



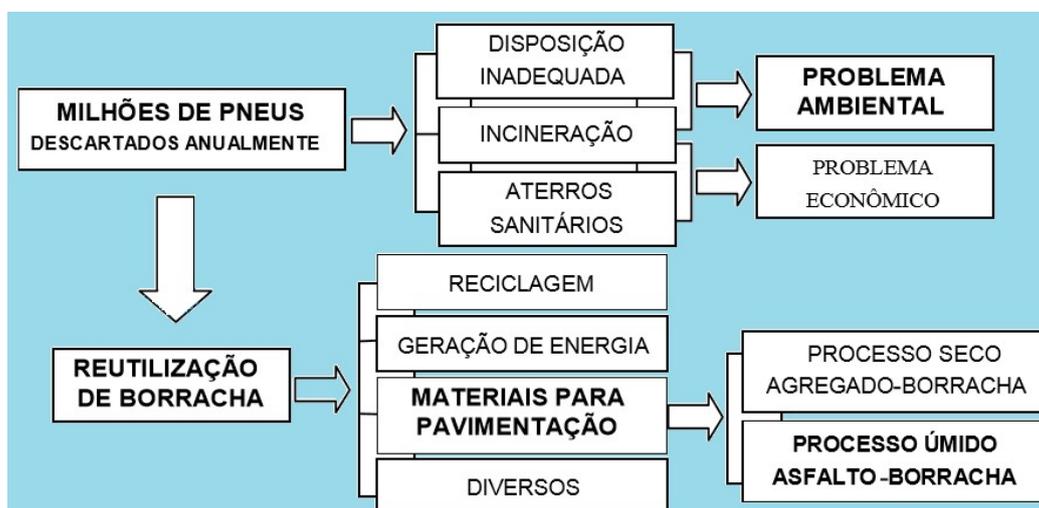
<http://www.macaee.rj.gov.br>

Os pneus inservíveis, se descartados de forma inadequada representam considerável passivo ambiental, representando dessa forma um grande risco para à saúde pública e meio ambiente (PINTO E PINTO, 2019).

3.3 Alternativas para o reuso do pneu inservível

Mesmo que o descarte de pneus seja complicado, é possível fazê-lo de forma correta, isso porque existem centros de descarte especializados na realização da reciclagem desses pneus que contribuem para a preservação do meio ambiente. Existem outros processos mais complexo de reutilização de pneus velhos onde são triturados a ponto de se tornarem insumos para a fabricação de produtos, a exemplo temos na fabricação do asfalto borracha. A mistura, que serve para acabamento asfáltico em ruas, também pode ser reprocessada a ponto de virar borracha. Na Figura 8 pode-se observar o ciclo de pneus inservíveis (ANDRADE; ALVES, 2019).

Figura 8 - Ciclo dos pneus inservíveis e seus possíveis destinos



Fonte: ODA, 2001.

A figura mostra o ciclo de pneus em desuso desde a concepção até a confecção do asfalto borracha, A não reciclagem do pneu ocasiona disposição inadequada, incineração e aterros sanitários gerando grandes impactos ambientais

prejudicando o meio ambiente e a economia. No processo de reutilização os resultados são positivos proporcionando reciclagem, geração de energia, material para pavimentação assunto abordado como tema e além de outros processos de reutilização (FLORIANI; FURLANETTO; SEHNEM, 2016).

3.4 Asfalto

Os asfaltos podem ser encontrados em estado natural ou obtidos da refinação do petróleo: asfalto natural (AN), asfalto de petróleo (AP), conforme descreve Pinto e Pinto (2019).

Os revestimentos asfálticos mais utilizados na pavimentação são o Concreto Asfáltico/ Betuminoso Usinado a Quente (CAUQ ou CBUQ) e o Pré-Misturado a Frio (PMF), ambos são compostos por 4% a 6% de material betuminoso ligante, Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), e agregados pétreos de diferentes granulometrias, conforme o traço requerido. Também são bastante aplicados na pavimentação os asfaltos diluídos e as emulsões asfálticas. Alguns conceitos, parâmetros para melhor compreensão dos fatores técnicos que determinam o desempenho e a aplicabilidade do CAP seguem abaixo (PINTO e PINTO, 2019; ANDRADE; ALVES, 2019):

- Ponto de Amolecimento (PA): consiste em uma medida empírica de consistência dos materiais betuminosos e corresponde, aproximadamente, à temperatura do ponto de fusão do CAP. Através do método internacional de utilização de uma argola e uma esfera, determina-se a mínima temperatura de fusão do CAP, ensaio de grande importância nos estudos reológicos do insumo.
- Viscosidade Saybolt-Furol: Consiste no tempo (em segundos), que determinada quantidade de material betuminoso leva para fluir por um orifício de dimensões padronizadas, a determinada temperatura. O ensaio se destina a medir a consistência dos materiais betuminosos em estado líquido, de forma prática. É de grande importância na definição das consistências adequada para cada operação de mistura, espalhamento e compactação de massas betuminosas. Também podem ser realizados ensaios de viscosidade absoluta e cinemática.
- Penetração: esse ensaio permite a determinação da consistência do asfalto em seu estado semissólido, consiste em determinar a profundidade, em

décimos de milímetro, que uma agulha padronizada penetra verticalmente, durante cinco segundos, em uma amostra de cimento asfáltico à temperatura de 25 °C. O grau de dureza do CAP é tanto maior quanto menor for o valor da penetração da agulha na amostra; dessa forma, o CAP 30/45 é mais duro que o CAP 85/100. Índices de penetração muito baixos podem indicar betumes velhos e quebradiços.

- **Ductilidade/ Recuperação Elástica:** É a distância em centímetros que uma amostra de material betuminoso, em condições padronizadas, submetida a uma tração, em condições especificadas, se rompe. A temperatura do ensaio é de 25 °C, e a velocidade de deformação, 5 cm/min. Parâmetro muito importante para determinar a capacidade de determinado material suportar grandes deformações sem ruptura. Quanto mais dúctil, mais flexível.

O Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP), as normas brasileiras ABNT NBR e a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis em sua Resolução N.º 19 de 11 de julho de 2005 - Regulamento Técnico ANP no 03/2005, especificam quatro tipos de CAP, assim caracterizados pelo ensaio de Penetração: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200.

3.5 Polímeros

De acordo com Callistere William (2002) os polímeros são materiais que podem ter origem natural ou sintética e podem ser classificados de acordo com seu comportamento mecânico, sendo divididos em termoplásticos, termofixos (ou termorrígidos) e elastômeros. Pode-se destacar na produção de pneus os elastômeros que se caracterizam pela habilidade de serem deformados em níveis elevados, e retornarem elasticamente às suas formas originais. Isso é resultado das ligações cruzadas presentes no polímero, as quais realizam uma força que permite o retorno da cadeia às suas conformações não deformadas.

O comportamento do polímero sintético depende dos materiais e do tipo de reação empregado para preparação, nem todos os polímeros devem ser aplicados em misturas asfálticas e uma parte apresenta estabilidade para estocagem. A quantidade de polímeros para composição de asfalto baseia-se em propriedades físicas desejadas, considerando a adequada dispersão do polímero CAP- Cimento Asfáltico de Petróleo. As misturas asfálticas são normalmente confeccionadas a

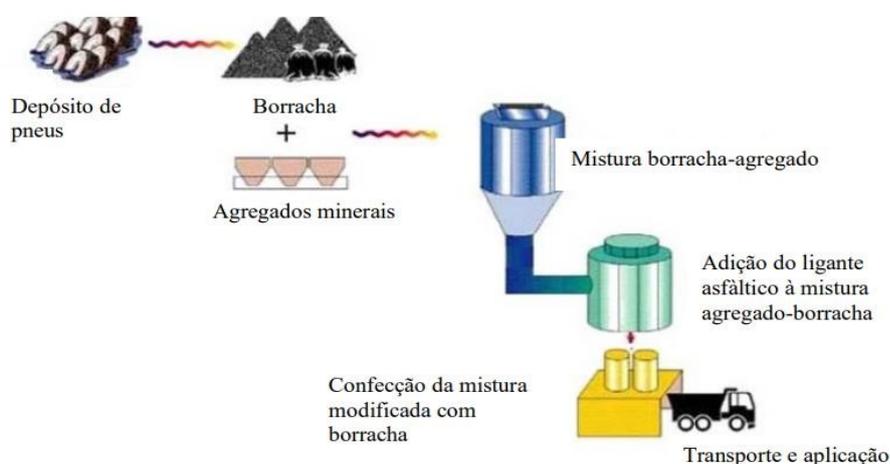
partir da incorporação de borracha triturada de pneus inservíveis ao Cimento Asfáltico de Petróleo sendo submetida a aquecimento ou não, podendo também ser usado como aditivo depois do processo de extrusão (SILVA; COELHO, 2018).

De acordo com Neto (2003) para que a mistura asfáltica seja viável e economicamente é necessário que se misture corretamente os ligantes, devendo manter suas propriedades intactas, melhor fluidez e altas temperaturas, sem que o ligante fique muito viscoso para misturas e espalhamento, nem tão rígido e quebradiço a baixas temperaturas.

Os processos de inserção da borracha no pavimento podem ser por meio de via seca e úmida, adequando-se as características físico-químicas incorporando um asfalto com maior durabilidade, viscosidade e capacidade de elasticidade superior ao asfalto convencional (WICKBOLDT, 2005).

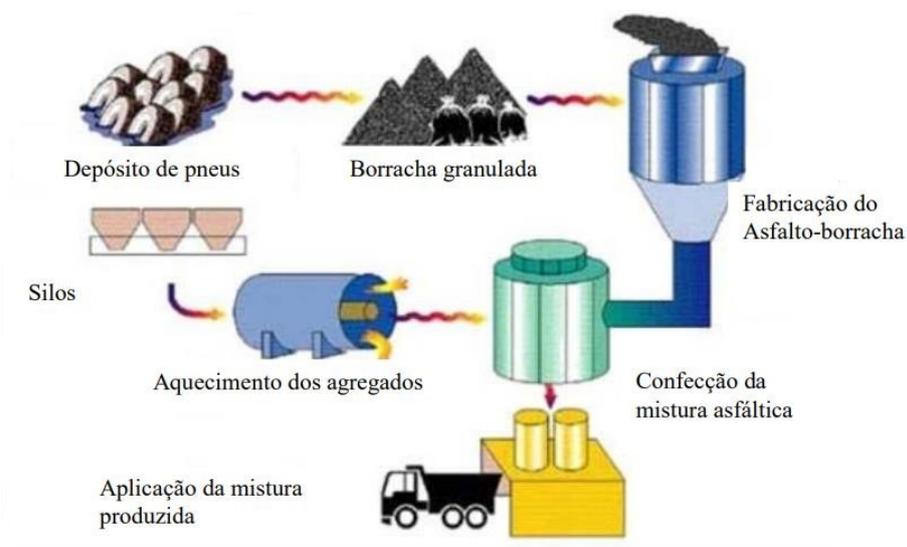
Nos dias atuais, as misturas para o asfalto com adição de resíduos de pneus são realizadas por meio de diversas técnicas, destacando entre elas, o processo seco, a borracha triturada é adicionada na mistura asfáltica como parte dos agregados da mistura, sendo chamada então de agregado-borracha e o processo úmido onde a borracha triturada é incorporada ao CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) em elevada temperatura, destacamos também que no processo úmido, o pó de pneus representa em geral 15 a 20% da massa de ligante. A Figura 9 demonstra as etapas do processo seco para a modificação de misturas asfálticas com borracha e na Figura 10 a representação das etapas de produção do asfalto borracha (CAVA 2020).

Figura 9 - Processo seco para a modificação das misturas asfálticas com borracha



Fonte: (BERNUCCI et al., 2010)

Figura 10 - Processo úmido para fabricação do asfalto borracha.



Fonte: (BERNUCCI et al., 2010)

3.6 Asfalto borracha

Na década de 1950, foram realizadas algumas tentativas da utilização de borracha de pneus na massa asfáltica, porém os resultados não estimularam os pesquisadores. Alguns anos depois, o engenheiro Charles H. McDonalds, ao realizar alguns serviços de tapa-buracos, resolveu experimentar a mistura de pó de pneu na massa asfáltica e concluiu que não oxidava como os asfaltos convencionais. Devido a esse feito passou a ser considerado o precursor do asfalto borracha. A mistura desenvolvida por Charles apresentou ser 40% mais resistente que o asfalto convencional além de possuir diversas vantagens, entre elas: melhor conforto, baixo ruído e aderência elevada onde diminui a possibilidade de derrapagem (WICKBOLDT, 2005).

Já no Brasil, os primeiros estudos com foco na mistura de borracha em ligantes asfálticos surgiram a partir da década de 1990, mas a aprovação e incentivo do uso da borracha em obras rodoviárias ocorreu apenas no ano de 1999, pela Res. nº 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA.

A primeira aplicação do asfalto borracha no Brasil é datada de 2001, na Rodovia BR116/RS, realizada pela empresa Greca Asfaltos. Após mais de quinze anos da primeira aplicação, o asfalto borracha foi incorporado na massa asfáltica em

diversos trechos pelo país, muitos deles com sucesso, porém com algumas dificuldades. A partir de então, muitas pesquisas começaram a ser realizadas visando aperfeiçoar esse tipo de pavimento, em que a técnica de produção e aplicação começaram a ser desenvolvidas, ganhando cada vez mais espaço no mercado do setor devido aos benefícios apresentados.

ECOFLEX é a principal referência no mercado nacional quando o assunto é Asfalto Borracha. Pioneira na fabricação deste produto, a GRECA Asfaltos buscou referências em países como Estados Unidos e África do Sul para desenvolver uma tecnologia que melhor se adaptasse ao território brasileiro.

Em agosto de 2001, após estudos realizados com o LAPAV (Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul), foi inaugurada a primeira obra de pavimentação com Asfalto Borracha no Brasil, na BR-116, no RS, num trecho localizado entre Guaíba e Camaquã, sob concessão da Univias, demonstrado na Figura 11. Mais do que vantagens para o pavimento, a incorporação de pó de borracha moída de pneus ao CAP comum representa nestes mais de 12 anos de história, um consumo total de mais de 6 milhões de pneus inservíveis que seriam descartados na natureza.

Figura 11 – Asfalto Borracha BR - 116



Fonte: Greca Asfaltos, (2020).

A concessionária Ecovia, que administra a malha rodoviária que liga Curitiba ao litoral do Paraná, faz o uso do asfalto borracha desde 2008. Importante destacar também que no ano de 2016, a empresa relatou que aplicou quase 1,7 mil toneladas de asfalto borracha em obras de pavimentação. A Figura 12 apresenta uma fotografia da Ecovia Curitiba ao Litoral do Paraná.

Figura 12 – Ecovia Curitiba ao Litoral do Paraná



Fonte: Greca Asfaltos, (2020).

Destaque para a inauguração, em maio de 2007, da unidade de asfaltos modificados com borracha e polímeros de Betim (MG), resultado da incorporação da FEAMIG Asfaltos, pois com esta, o Grupo GRECA Asfaltos completou quinze unidades de distribuição de asfalto, das quais oito com fábricas de asfaltos modificados e emulsões, todas estrategicamente localizadas no território nacional. Outra aplicação do asfalto borracha na restauração da pavimentação foi na rodovia RJ-122, no ano de 2011, com o emprego de uma técnica de Mistura Contínua em Usina utiliza o conceito de água morna na composição dos agregados, mostrou vantagens e oportunidades que renderam ao projeto uma premiação internacional (DER-RJ, 2020).

A rodovia RJ-122 possui um traçado de 35,6 km cuja diretriz principal conecta os municípios fluminenses de Guapimirim e Cachoeiras de Macacu (SEAERJ, 2013). Além disso, essa rodovia interliga a rodovia federal BR116 à outra rodovia estadual, a RJ-116. Segundo os requisitos apresentados em DNIT (2009). De acordo com o DER-RJ (2020), a pavimentação da rodovia empregou 54 mil toneladas de resíduos de borracha provenientes de 200 mil pneus inservíveis a um custo total de R\$ 63 milhões.

4 METODOLOGIA

Tratou-se de um levantamento bibliográfico e exploratório com abordagem qualitativa com ênfase nos temas abordados, através de pesquisas em sites de empresas que se utilizam da solução proposta e produtos similares, além de consultas à página eletrônica da CRECA Asfaltos. Outros artigos de engenharia relacionados com o tema também foram consultados e utilizados como referência. Livros e manuais de pavimentação como o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), com a finalidade de encontrar métodos construtivos e sustentáveis para uso de pavimentação.

Foram utilizados como termos booleanos “asfalto borracha”, “asfaltos modificados”, “mistura asfáltica com borracha”, além de “asfalto-borracha” grafia encontrada em algumas publicações. Como critério de exclusão, as publicações postadas em sites não oficiais ou blogs não foram incorporadas neste trabalho. Ao total foram lidos os títulos e resumos de 86 publicações e foram considerados 44 em língua portuguesa e inglesa para a elaboração do presente trabalho.

Pode-se ainda classificar como uma pesquisa exploratória, inicialmente o estudo buscou aprofundar os conceitos em relação ao tema abordado, buscando as principais publicações que tratam do tema.

O produto técnico desenvolvido foi um guia informativo sobre o potencial reciclável de pneus e orientações sobre descarte. As informações e imagens disponibilizadas foram coletadas em artigos, trabalhos acadêmicos e sites, além de parte dos autores utilizados na elaboração da parte escrita da dissertação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação ao asfalto modificado com borracha, segundo Wickboldt (2005), a história da adição de borracha de pneus incorporada ao asfalto remonta a década de 1940, quando nos Estados Unidos, a RuberReclaimingCompany, introduziu no mercado um produto desvulcanizado ou borracha reciclada, denominado RamflexTM, como uma partícula seca aditivada à mistura de asfalto. Segundo Di Giulio (2007), no Brasil o uso da borracha em pavimentação asfáltica foi aprovada em 1999, pela Resolução nº 258 do CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, de agosto de 1999.

Os cimentos asfálticos de petróleo modificados por borracha moída de pneus, Asfaltos Borracha, especificado na Resolução ANP nº39, de 24/12/08, devem possuir as características conforme tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo modificados por Borracha Moída de Pneus – Asfaltos.

| CARACTERÍSTICA TIPO | UNIDADE | LIMITE | | MÉTODO | |
|---|---------|----------|-----------|----------|--------|
| | | AB8 | AB22 | ABNT/NBR | ASTM |
| Penetração (100 g, 5s, 25°C) | 0,1 mm | 30 – 70 | | 6576 | D 5 |
| Ponto de amolecimento, mín. | °C | 50 | 55 | 6560 | D 36 |
| Viscosidade Brookfield a 175°C, spindle 3, 20 rpm, máx. | cP | 800-2000 | 2200-4000 | 15529 | D 2196 |
| Ponto de fulgor, mín. | °C | 235 | | 11341 | D 92 |
| Estabilidade à Estocagem, máx. | °C | 9 | | 15166 | D 7173 |
| Recuperação Elástica a 25° C, 10 cm, mín. | % | 50 | 55 | 15086 | D 6084 |
| Variação em massa do RTFOT, máx | % massa | 1,0 | | 15235 | D 2872 |
| Ensaio no Resíduo RTFOT | | | | | |
| Variação do ponto de amolecimento, máx. | °C | 10 | | 6560 | D 36 |
| Porcentagem de Penetração original, mín. | % | 55 | | 6576 | D 5 |
| Porcentagem de Recuperação Elástica Original (25°C, 10 cm) mín. | % | 100 | | 15086 | D 6084 |

Fonte: Resolução ANP nº39, de 24 de dezembro de 2008.

O asfalto com adição de borracha de pneus apresenta melhores desempenhos nos ensaios de Penetração, Ponto de Amolecimento, Viscosidade,

Ductilidade, semelhantes ao asfalto modificado com polímero, conferindo-lhe propriedades superiores se comparado ao asfalto convencional, (PINTO e PINTO, 2019).

Estudos desenvolvidos e ensaios de campos disponibilizados pela GRECA (2003) apontam que vários fatores destacam a vantagem do asfalto com borracha em relação ao asfalto convencional, tais como:

- Redução da suscetibilidade térmica;
- Aumento da flexibilidade de adesividade do pavimento;
- Resistência ao envelhecimento devido à presença de antioxidantes e carbono na borracha de pneus;
- Redução de ruídos, pouco estudado no Brasil, entretanto, nos países europeus é um critério bastante relevante em se tratando de conforto ao usuário;

A seguir são apresentadas as Tabelas 2 e 3 que apresentam respectivamente as especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) Classificação por Penetração e dos Cimentos Asfálticos de Petróleo Modificados por Polímeros Elastoméricos.

Tabela 2 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) Classificação por Penetração.

| Características | Unidade | Limites | | | | Métodos | |
|--------------------------------------|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|--------|
| | | CAP 30-45 | CAP 50-70 | CAP 85-100 | CAP 150-200 | ABNT | ASTM |
| Penetração (100g, 5s, 25, °C) | 0,1mm | 30 a 45 | 50 a 70 | 85 a 100 | 150 a 200 | NBR 6576 | D 5 |
| Ponto de Amolecimento | °C | 52 | 46 | 43 | 37 | NBR 6560 | D 36 |
| Viscosidade Saybolt-Furol | s | | | | | NBR 14950 | E 102 |
| a 135°C | | 192 | 141 | 110 | 80 | | |
| a 150°C | | 90 | 50 | 43 | 36 | | |
| a 177°C | | 40 a 150 | 30 a 150 | 15 a 60 | 15 a 60 | | |
| Viscosidade Brookfield | cP | | | | | NBR 15184 | D 4402 |
| a 135°C, SP 21, 20rpm min | | 374 | 274 | 214 | 155 | | |
| a 150°C, SP 21, min | | 203 | 112 | 97 | 81 | | |
| a 177°C, SP 21 min | | 76 a 285 | 57 a 285 | 28 a 114 | 28 a 114 | | |
| Índice de Suscetibilidade Térmica | | (-1,5) a (+0,7) | (-1,5) a (+0,7) | (-1,5) a (+0,7) | (-1,5) a (+0,7) | - | - |
| Ponto de Fulgor min. | °C | 235 | 235 | 235 | 235 | NBR 11341 | D 92 |
| Solubilidade em tricloroetileno, min | % massa | 99,5 | 99,5 | 99,5 | 99,5 | NBR 14855 | D 2042 |
| Ductilidade a 25 °C, min. | cm | 60 | 60 | 100 | 100 | NBR 6293 | D 113 |

Fonte: Resolução ANP nº19, de 11 de julho de 2005

Tabela 3 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo Modificados por Polímeros Elastoméricos

| CARACTERÍSTICA | UNIDADE | LIMITE | | | MÉTODO | |
|---|---------|---------|---------|---------|-------------|-------|
| | | Tipo | | | ABNT NBR | ASTM |
| | | 55/75-E | 60/85-E | 65/90-E | | |
| Penetração (100 g, 5s, 25°C) | 0,1mm | 45 - 70 | 40 - 70 | | 6576 | D5 |
| Ponto de amolecimento, mín | °C | 55 | 60 | 65 | 6560 | D36 |
| Viscosidade Brookfield | | | | | 15184 | D4402 |
| a 135°C, spindle 21, 20 rpm, máx. | cP | 3000 | | | | |
| a 150°C, spindle 21, 50 rpm, máx. | | 2000 | | | | |
| a 177°C, spindle 21, 100 rpm, máx. | | 1000 | | | | |
| Ponto de fulgor, mín | °C | 235 | | | 11341 | D92 |
| Ensaio de separação de fase, máx. | °C | 5 | | | 15166 | D7173 |
| Recuperação elástica a 25°C, 20 cm, mín | % | 75 | 85 | 90 | 15086 | D6084 |
| Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 minutos | | | | | | |
| Variação em massa, máx (1) | % massa | 1,0 | | | 15235 | D2872 |
| Variação do ponto de amolecimento, máx | °C | -5 a +7 | | | 6560 | D36 |
| Percentagem de penetração original, mín | % | 60 | | | 6576 | D5 |
| Percentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín. | % | 80 | | | 15086 | D6084 |

Fonte: Resolução ANP nº 32, de 21 de setembro de 2010.

Outra vantagem é a possibilidade de diminuir a espessura do revestimento fazendo com que se obtenha uma considerável economia no custo total da obra. Destaca-se também uma maior vida útil do pavimento (durabilidade), maior aderência dos pneus, redução do ruído provocado pelo tráfego, retorno elástico elevado, grande resistência à oxidação do pavimento que causa envelhecimento precoce, resistência às intempéries (as variações do tempo), resistência superior em relação às deformações plásticas, menos manutenção, redução da formação de trilhas de roda e propagação de trincas (CATAPRETA; ZAMBIASI; LOYOLA, 2016).

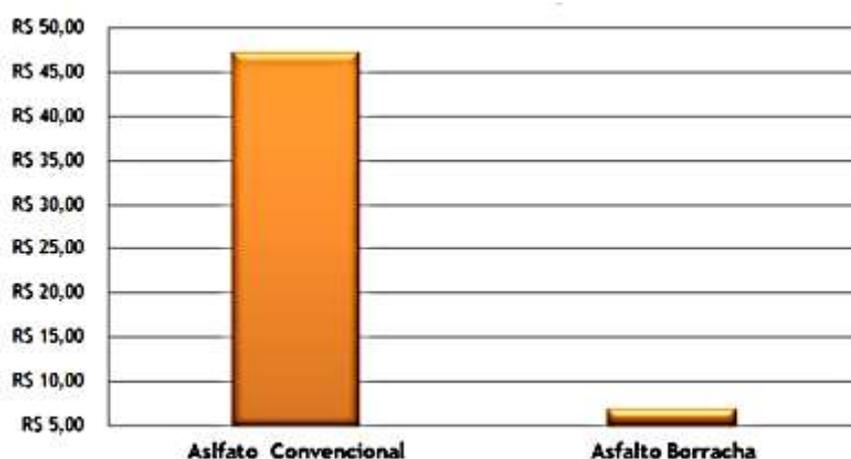
Também apresenta como o benefício de redução do tempo de liberação da pista ao tráfego em relação à execução com asfalto tradicional. Isso se deve pela redução do tempo de resfriamento da mistura, que é maior em relação ao material convencional devido às suas características (ARAÚJO, 2015).

A durabilidade varia de acordo com as condições da estrada, somando-se fatores como a temperatura, clima e a intensidade do tráfego, onde em uma rodovia de alto tráfego, com estrutura de pavimento robusta, o asfalto borracha pode durar cinco anos, e em uma de baixo tráfego, bem estruturada e com as mesmas condições climáticas pode durar de 25 a 30 anos (SOUZA; MOTA, 2019).

As desvantagens em relação ao uso do asfalto borracha estão relacionadas ao seu processo de fabricação, onde necessita de agitação em alto cisalhamento, o que acaba provocando a emissão de compostos orgânicos totais (os voláteis + os aerossóis), sendo alguns destes considerados como cancerígenos (CAVA, 2020). Também relacionada ao processo de fabricação constatou-se a emissão de fumos de asfalto (vapores resultantes do aquecimento da massa asfáltica à temperatura superior a 150 °C, tais como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, que são potencialmente tóxicos e cancerígenos), além de possuir um forte odor (ANDRADE e ALVES, 2019).

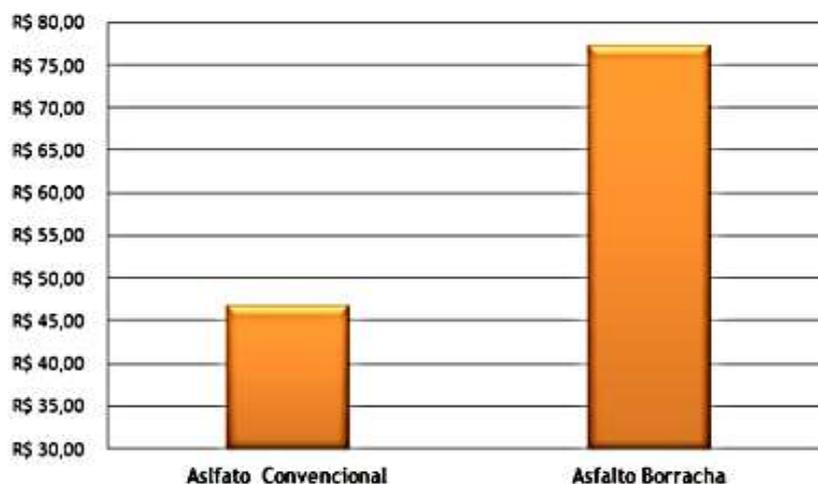
No Brasil, um pouco mais de 8 mil km de estradas são pavimentados com asfalto borracha, enquanto que nos EUA já passa de 70% do total de vias. O estudo de caso de Zatarin et al. (2017) escolheu uma rua na cidade de Curitiba construída no ano de 2005 para avaliar a viabilidade financeira do asfalto borracha no custo de execução e manutenção (após 7 anos de uso) obtendo os seguintes resultados visualizados nas Figuras 14 e 15, que demonstra o custo de execução do asfalto convencional que foi de aproximadamente R\$ 45,00 comparado ao do asfalto borracha R\$ 75,00, e o custo de manutenção do asfalto convencional que foi de aproximadamente R\$ 45,00 e do asfalto borracha R\$ 5,00.

Gráfico13 - Custo de execução



Fonte: ZATARIN et al., (2017).

Gráfico 14 - Custo de manutenção



Fonte: ZATARIN et al., (2017).

O autor concluiu que, após somar os custos da execução e manutenção do trecho analisado, o asfalto convencional teve um custo 11,69% maior neste período de 7 anos. Para fim de custos unitários, foram utilizados os dados da Tabela SETOP, Secretaria de Estado de Transportes e Obras Públicas de Minas Gerais, com referência de setembro/2020. Sendo coletados os insumos de CBUQ CAP (concreto betuminoso usinado a quente/Cimento Asfáltico de Petróleo) e CBUQ modificado por borracha incluindo execução, usinagem, aplicação, espalhamento, compactação e fornecimento dos agregados. Obteve-se como custos, em Reais, de uma tonelada como informado na Tabela 4:

Tabela 4 - Referencial de preços em Reais

| CÓDIGO | DESCRIÇÃO | UNID. | CUSTO |
|----------|------------------------------|-------|--------|
| RO-41177 | CBUQ CAP 50/70 | ton | 211,70 |
| RO-43829 | CBUQ Modificado por Borracha | ton | 224,10 |

Fonte: SETOP, (2020).

Outro estudo foi realizado no Bairro Campestre em Monte Carmelo – MG, por Souza e Mota (2019), onde o resultado de um experimento com aplicação de asfalto borracha nas vias urbanas do Bairro concluiu que o pavimento apresenta ser mais resistente acarretando menos necessidade de manutenção e, de acordo com o SETOP que é a planilha referencial de preços para as obras do Estado de Minas Gerais e SINAPI Sistema nacional de pesquisa de custos e índices, foi constatado um custo reduzido em comparação ao asfalto convencional, tornando-se mais viável no longo prazo. Destacamos também o estudo realizado em laboratório pelo autor Araújo (2015) comparando a resistência entre o asfalto convencional, o asfalto borracha. A Figura 11 apresenta uma comparação visual do asfalto convencional com o asfalto borracha.

Figura 15 - Asfalto Convencional



Asfalto Borracha



Fonte: BERNUCCI et al., (2010).

O asfalto borracha apresentou uma resistência 28% superior que a resistência do asfalto convencional porque, segundo o autor, a borracha adicionada ao ligante possui propriedades elásticas além de elementos em sua composição que aumentam a resistência do asfalto.

Ele finaliza afirmando que, por meio dos ensaios realizados, o uso do asfalto borracha é viável nos aspectos ambientais, econômicos e técnicos.

O presente estudo resultou em um produto técnico de dissertação intitulado “Das rodas às pistas”, um guia que demonstra a utilidade de pneus inservíveis cuja a imagem da capa está na Figura 16. O mesmo será disponibilizado por meio digital, gratuitamente, com a finalidade de sensibilizar o público alvo (usuários de pneus, proprietários e administradores de retíficas e borracharias) quanto a importância de descartar corretamente os pneus inservíveis.

Figura 16– Guia produto técnico de dissertação “Das Rodas às pistas”.



Fonte: O autor, 2022.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da revisão bibliográfica percebe-se que a aplicação de método de pavimentação utilizando asfalto borracha é economicamente viável, pois, além de atribuir uma destinação ambientalmente correta a um resíduo com alto potencial poluente, reinsere no processo produtivo um material que estava inservível, reduz os custos com manutenção da via pavimentada e dos veículos que trafegam por ela.

Pelos resultados encontrados, verificou-se como principal obstáculo o maior custo desse tipo de pavimentação (30% mais cara), se comparada às convencionais, devido ao processo industrial de trituração e adição da borracha, aos processos de controle e coleta dos pneus inservíveis e pelas modificações necessárias nas usinas de asfalto. Isso faz com que sua utilização seja pouco visada, por causa do investimento necessário para o início de produção.

Porém, com as vantagens apresentadas anteriormente para o meio ambiente e a durabilidade, além das melhorias dos valores de propriedades em decorrência da reciclagem dos pneus, o custo benefício deve ser avaliado sendo que há ganhos financeiros viabilizados pela redução dos custos de conservação e manutenção. Desta forma, a longo prazo, os preços se equiparam, sendo um grande ponto a ser avaliado.

Pode-se destacar que além de proporcionar variados benefícios a sociedade, além de ser uma alternativa sustentável, o maior benefício é a diminuição dos impactos ambientais, já que 1km de asfalto borracha utiliza cerca de 600 pneus que poderiam ser descartados de forma incorreta na natureza.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, G. A. G. D.; ALVES, M. D. A. **Estudo Comparativo Técnico, Econômico e Ambiental entre o Asfalto-Borracha e o Asfalto Convencional.** Maceió. 2019.

ARAÚJO, D. H. **Análise Comparativa do Asfalto Borracha com o Asfalto Convencional e o Asfalto com Adição de Polímeros.** UNIFOR. Formiga. 2015.

BERNUCCI, L.B; MOTTA, L.M; CERRATI, J.A.P; SOARES, J.B. **Pavimentação asfáltica formação básica para os engenheiros.** 3 Ed. Rio de Janeiro, 2010.

BIAZIN, C.C.; GODOY, A M. G. **O selo verde: uma nova exigência internacional para as organizações.** Anais do XX Encontro Nacional de Engenharia da Produção e VII International Conference on Industrial Engineering and Operation management. São Paulo, p.1- 8, 30 de out. a 01 de nov. de 2000.

BORGES, Cecília. Recicle: a natureza agradece. **Banas ambiental**, dez. 1999, p. 32.

BRAGA, Benedito. **Gestão Ambiental no Brasil.** Ed. SENAC. São Paulo. 2004.

BRASIL. LEI FEDERAL **6.938/1981**, com fundamento no art. 8º, item XVII, alíneas c, h e i, da Constituição Federal, estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente. 1981.

CALLISTER JR., WILLIAM D., **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução.** 1a ed., ed., Rio de Janeiro, LTC, 2002.

CATAPRETA, Cícero Antonio Antunes; 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. 2016.

CAVA, F. **O Asfalto Borracha é um Asfalto Ecológico? além da Inércia,** 2020. Disponível em: Acesso em: 18 out. 2020.

CNT. Transporte Rodoviário - **Impactos da Qualidade do Asfalto sobre o Transporte Rodoviário,** 2019.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resoluções e outros atos.** Disponível em: Acesso em: 18 nov. 2020.

CONAMA. **Resolução nº 258/1999.** Dispõe sobre a coleta e destinação final de pneus inservíveis. 1999. Acesso em: 18 nov. 2020.

DER-RJ (2011). **Governo do estado e DER-RJ inauguraram rodovia em Cachoeiras de Macacu**. Disponível em: http://www.der.rj.gov.br/detalhe_noticia.asp?ident=270 Acesso em: 05set. 2020.

DI GIULIO, G. **Vantagens ambientais e econômicas no uso de borracha em asfalto**. Inovação Uniemp, Campinas, v. 3, n. 3, jun. 2007.

DNIT – Departamento Nacional de Infra Estrutura de Transporte. **Especificação Concreto Asfáltico com Asfalto Borracha**. Rio de Janeiro: IPR, ES 112/2009. 13p.

FLORIANI, Marco; FURLANETTO, Vinicius; SEHNEM, Simone. Descarte sustentável de pneus inservíveis. Navus - Revista de Gestão e Tecnologia. 6. 37-51. 2016.

FREITAS, **Eduardo de. Estocolmo-72. Site Brasil Escola. [2020]**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/estocolmo-72.htm>. Acesso em: 03 de mai. 2020.

FONTOURA, B. L.; MERINO, Giselle; FIGUEIREDO, Luiz. A Contribuição da Gestão de Design para a Sustentabilidade Empresarial. 2018. p.1-15.

GOUVEIA, N. **Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social**. Ciência & Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, p. 1503-1510, jun. 2012.

GRECA, ASFALTOS. **Linha Ecoflex**. Disponível em: <www.grecaasfaltos.com.br/asfalto-borracha-ecoflex-asfalto-ecologico/>. Acesso em 14 de out 2021.

GRECA ASFALTOS. **Durabilidade, tecnologia e sustentabilidade**. Disponível em: <<http://www.grecaasfaltos.com.br/asfalto-borracha>>. Acesso em 14 de out 2021.

GRECA ASFALTOS. **Grupo GRECA Asfaltos**. Desde 1959, mais de 60 anos de história. 2018. Disponível em: GRECA ASFALTOS. Fatos & Asfaltos. Blog, 2020. Acesso em: 2 nov. 2020.

KINLAW, Denis C. **Empresa competitiva & ecológica: desempenho sustentado na era ambiental**. São Paulo: Makron Books, 1997.

LAGO, A. A. C. Estocolmo, Rio, Joanesburgo o Brasil e as três conferências ambientais das Nações Unidas. Fundação Alexandre de Gusmão (Funag) Ministério das Relações Exteriores. 2006.

NETO, Silvrano Adonias Dantas; FARIAS, Márcio Muniz de; PAIS, Jorge C.; SOUSA, Jorge B.; **Propriedades mecânicas de misturas betuminosas confeccionadas com asfalto borracha**. 34ª Reunião anual de Pavimentação, Campinas, SP, Brasil; 2003

OLIVEDO, Douglas Pereira. **Asphalt with rubber addition of unusable tires**. 2018. Número total de folhas 33. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Uniderp, Campo Grande, 2018.

ODA, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. 2000. 251 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Acesso: 12 set. 2020.

PARRA, C. V.; NASCIMENTO, A. P. B.; FERREIRA, M. L. Reutilização e Reciclagem De Pneus, E Os Problemas Causados **Por Sua Destinação Incorreta**. Universidade Nove de Julho, São Paulo. 2010.

PIMENTA, Carlos Reynaldo Toledo e OLIVEIRA, Marcio Pires de. **Projeto geométrico e rodovias**. São Carlos: RiMa. 2001.

PINTO Salomão; PINTO Isaac Eduardo. Pavimentação asfáltica: **Conceitos Fundamentais sobre Materiais e Revestimentos Asfálticos**. LTC 1ª ed. Rio de Janeiro, 2019.

RECICLANIP. **Programa de destinação de pneus inservíveis. 2020**. Disponível em: <http://www.reciclanip.com.br>. Acesso em: 2 fev. 2021.

RIBEIRO, Celso Munhoz; Biagio F. Gianneti e Cecilia M. V. B. Almeida. **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV): Uma Ferramenta Importante da Ecologia Industrial**. Disponível em: <http://www.hottopos.com/regeq12/art4.htm>. Acesso em: 4 jul. 2020.

ROZENFELD, H; AMARAL, D.C.; ALLIPRANDINI, D.H.; FORCELLINI, F.; TOLEDO, J.C.; SCALICE, R. SILVA, S.L. **Gestão de desenvolvimento de produto: uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006.

SEAERJ (2013). **Modelo Rodoviário** – DER-RJ prevê investir R\$13, bilhão em estradas em 2014. Revista SEAERJ Hoje, n. 22. 2014.

SENADO FEDERAL. **Rio+20, em busca de um mundo sustentável**. Revista Em Discussão, Revista de audiências públicas do Senado Federal Ano 3, Nº 11, junho. 2012.

SETOP. **Preços Secretaria de Estado de Transportes e Obras Públicas de Minas Gerais. Referência Setembro/2020**, Região Triângulo e Alto Paranaíba, 2020.

SILVA, L. C. N. A Logística reversa de pneus no Brasil. Ecos juntos, podemos. 2020. Disponível em: ecossocioambiental.org.br. Acesso em: 03 abr. 2020.

SILVA, Gabriella. COÊLHO, Mauro Frank Oguino. Uso do asfalto borracha na pavimentação de rodovias. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 11, Vol. 01, pp. 96-117 Novembro de 2018.

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

STRAUCH, Manuel; ALBUQUERQUE, Paulo Peixoto de. **Resíduos: como lidar com recursos naturais.** São Leopoldo: Oikos, 2008.

TACHIZAWA, Takeshy e POZO, Hamilton. **Gestão sociomambiental e desenvolvimento sustentável: um indicador para avaliar a sustentabilidade empresarial.** Revista eletrônica do PRODEMA. Fortaleza, v 1, n 1, P. 35-54, dez. 2007.

WICKBOLDT, V. S. **Ensaio Acelerados de Pavimentos para Avaliação de Desempenho de Recapeamentos Asfálticos** – Dissertação de Mestrado – PPGEC/UFRGS. 134p. 2005.

ZATARIN, A. P. M., SILVA, A. L. F., ANEMAM, L. S., BARROS, M. R., CHRISOSTOMO, W. **Viabilidade da pavimentação com asfalto-borracha.** Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 5, n. 2, p. 649-674. 2017.