

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

NICOLAS FERNANDES VUCOVIC

**AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA DESCARTE E
REUSO DE PNEUS: Incorporação na massa asfáltica para
produção de asfalto borracha**

São José dos Campos

2021

NICOLAS FERNANDES VUCOVIC

**AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA DESCARTE E
REUSO DE PNEUS: Incorporação na massa asfáltica para
produção de asfalto borracha**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de São
Paulo como requisito parcial para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia de
Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Marina Oliveira de
Souza Dias

São José dos Campos

2021

NICOLAS FERNANDES VUCOVIC

**AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA DESCARTE E
REUSO DE PNEUS: Incorporação na massa asfáltica para
produção de asfalto borracha**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de São Paulo como requisito
parcial para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Marina Oliveira de Souza Dias

Universidade Federal de São Paulo

Orientadora

Profa. Dra. Mariana Motisuke

Universidade Federal de São Paulo

Na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei de direitos autorais nº 9610/98, autorizo a publicação livre e gratuita desse trabalho no Repositório Institucional da UNIFESP ou em outro meio eletrônico da instituição, sem qualquer ressarcimento dos direitos autorais para leitura, impressão e/ou download em meio eletrônico para fins de divulgação intelectual, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UNIFESP São José dos Campos com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Vucovic, Nicolas Fernandes.

Avaliação de alternativas para descarte e reuso de pneus: Incorporação na massa asfáltica para produção de asfalto borracha / Nicolas Fernandes Vucovic - 2021.

35 f.

Trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia de materiais) – Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia, 2021.

Orientadora: Marina Oliveira de Souza Dias

Título em outro idioma: Evaluation of alternatives for disposal and reuse of tires: Incorporation in the asphalt mix for rubber asphalt production.

1. Descarte incorreto de pneus inservíveis. 2. Problemas ambientais relacionados ao descarte incorreto de pneus inservíveis. 3. Formas de reaproveitamento de pneus inservíveis. 4. Incorporação de pneus inservíveis na massa asfáltica. I. Dias, Marina Oliveira de Souza. II. Trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia de materiais) – Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia. III. Avaliação de alternativas para descarte e reuso de pneus: Incorporação na massa asfáltica para produção de asfalto borracha.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a minha família que sempre esteve presente ao meu lado me dando forças e incentivo todos esses anos que permaneci na universidade, por todo ensinamento, amor, dedicação e apoio durante todos os acontecimentos da minha vida, por ensinarem desde cedo valores imprescindíveis para o meu desenvolvimento como ser humano, a importância da educação e o respeito ao próximo.

À minha namorada Giovana, que sempre me incentivou na realização dos meus ideais, encorajando-me a enfrentar os momentos difíceis da vida, dedicando seu tempo e compartilhando sua experiência de modo a criar uma visão mais positiva da vida. Ajudou a tornar-me um pensador com seu olhar crítico sobre o cotidiano, ampliando a minha visão do mundo. Obrigado por toda paciência, compreensão, carinho, amor e por me ajudar inúmeras vezes a achar soluções quando elas aparentemente não existiam.

Aos amigos conquistados que se tornaram irmãos ao longo desses anos, pela amizade, apoio, ajuda e, principalmente, pelos bons momentos vividos durante essa época, ao meu lado nos momentos de aflição e em momentos de felicidade.

À minha orientadora Marina e aos professores da Universidade Federal de São Paulo, pelos ensinamentos que me proporcionaram tantos benefícios pessoais e pela oportunidade de poder me desenvolver profissionalmente.

A todos que de alguma maneira participaram no desenvolvimento desta dissertação e no meu crescimento profissional, com amizade e transparência.

Resumo

Cerca de 100 milhões de pneus são descartados incorretamente todos os anos no Brasil, com disposição inadequada em lixões, aterros sanitários, terrenos baldios, se acumulando nas encostas de rodovias e rios, degradando o meio ambiente e causando também problemas para a sociedade como a proliferação do mosquito transmissor da dengue, por exemplo. Cerca de 60% dos pneus reciclados no Brasil são usados na indústria de cimento, como combustível alternativo no lugar do carvão. O restante é utilizado para a produção de solados de sapatos e cintas, pavimentação asfáltica e em artefatos de borracha, como amortecedores e tapetes automotivos. A pavimentação asfáltica empregando asfalto-borracha de pneus inservíveis tem sido uma das áreas mais estudadas e considerada uma das melhores alternativas para o descarte de pneus inservíveis, contribuindo para a preservação ambiental, assim como proporcionando o aumento de propriedades e desempenho do revestimento asfáltico como a durabilidade, resistência à propagação de trincas, qualidade e redução de custos. Neste trabalho de conclusão de curso serão avaliados os impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado de pneus, sendo apresentadas as alternativas para seu reuso e reciclagem, com destaque para o uso de pneus na pavimentação asfáltica, sendo discutidos o processo de produção, suas vantagens, desvantagens e seu potencial de aplicação no Brasil.

Palavras-chaves: Pneu. Reciclagem. Meio ambiente. Asfalto. Sustentabilidade.

Abstract

100 millions of tires are improperly disposed of each year in Brazil, with inadequate disposal in landfills, vacant lots, accumulating on the slopes of roads and rivers, degrading the environment and causing problems for society, such as the proliferation of the mosquito that transmits Dengue fever, for example. About 60% of the tires recycled in Brazil are used in the cement industry, as alternative fuel in replacement of coal. The remainder is used for the production of shoe soles and belts, asphalt paving and in rubber articles such as shock absorbers and automotive mats. Asphalt paving using asphalt rubber from waste tires has been one of the most studied areas and considered one of the best alternatives for discarding waste tires, contributing to environmental preservation, as well as increasing the properties and performance of asphalt coating, as durability, scratches resistance, quality and cost savings. In this work, the environmental impacts resulting from the inappropriate disposal of tires will be evaluated, and the alternatives for their reuse and recycling will be presented, with emphasis on the use of tires in the asphalt pavement, the production process, its advantages, disadvantages and its potencial of usage in Brazil.

Keywords: Tire. Recycling. Environment. Asphalt. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma do processo mecânico de trituração da borracha.....	16
Figura 2 - Processo seco para a modificação das misturas asfálticas com borracha.....	23
Figura 3 - Processo úmido para fabricação dos asfaltos-borracha.....	24
Figura 4 – Esquema de granulometrias de agregados.....	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS.....	12
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	12
3.1 PNEUS.....	12
3.2 ASPECTOS AMBIENTAIS DO DESCARTE INADEQUADO.....	13
3.2.1 Consequências sanitárias.....	14
3.3 RECICLAGEM E REUSO DE PNEUS INSERVÍVEIS.....	15
3.3.1 Trituração.....	15
3.3.2 Recauchutagem.....	17
3.3.3 Combustível.....	17
3.3.4 Artefatos de borracha.....	18
3.3.5 Utilização do pneu inteiro como forma de reaproveitamento.....	18
3.3.6 Massa asfáltica	19
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
5 DISCUSSÃO.....	21
5.1 OBTENÇÃO DO ASFALTO BORRACHA.....	21
5.1.1 Considerações iniciais.....	21
5.1.2 Ligantes asfálticos.....	22
5.1.3 Processo seco.....	22
5.1.4 Processo úmido.....	23
5.2 INTERAÇÃO ASFALTO BORRACHA.....	25
5.3 GRANULOMETRIA.....	26
5.3.1 Volume de vazios.....	26

5.3.2 Continuidade da curva granulométrica.....	27
5.4 PROPRIEDADES DO ASFALTO BORRACHA.....	28
5.5 POTENCIAL DE APLICAÇÃO.....	29
6 CONCLUSÕES.....	30
7 REFERÊNCIAS.....	32

1. INTRODUÇÃO

O descarte de pneus no meio ambiente é um grande problema especialmente por conta de seu elevado tempo de deterioração na natureza, além de contribuir para a transmissão de doenças, afetando não só o meio ambiente como também a população, tornando-se imprescindível alinhar-se com as formas de reciclagem que podem ser realizadas com os mesmos. A disposição incorreta dos pneus após o seu uso gera grandes impactos ambientais, sendo necessária a avaliação para a sua coleta e posterior reciclagem para evitá-los.

Com o reuso desses pneus, é possível evitar problemas ambientais, propiciando redução de locais para a proliferação de insetos, assim como menor obstrução em rios e lagos reduzindo a probabilidade de alagamentos. Também há a redução da demanda de petróleo, ao se considerar a substituição de parte do asfalto por borracha moída de pneus [1].

Sendo assim, alternativas para a reutilização dos pneus devem ser buscadas para minimizar estes impactos no meio ambiente, como por exemplo a sua recauchutagem, o uso como combustível na indústria do cimento, como carga em artefatos de borracha, solados de sapatos e em misturas asfálticas [2]. A recauchutagem é um processo que reduz o número de pneus inservíveis e que gera uma economia de cerca de 80% de energia se comparada ao processo de produção de um pneu novo [3]. O mesmo pode ser observado na indústria cimenteira, com a reutilização do pneu nas coqueiras. A reutilização definitiva de um pneu, tal como na sua incorporação em produtos como a massa asfáltica, deve ser priorizada para que se diminuam os impactos ambientais de forma efetiva [4].

Sendo assim, neste trabalho será discutida a reutilização dos pneus por meio de sua incorporação na massa asfáltica, de forma que seja possível reduzir a quantidade de pneus sem destino, melhorar as qualidades das estradas, visto que a inserção de pneus na massa asfáltica melhora as propriedades e aumenta o tempo de vida útil do asfalto. Ainda, consegue-se reduzir os custos de produção do asfalto e do recapeamento de vias. Para isto, será feita uma discussão sobre o contexto atual de produção e descarte de pneus, sendo em segundas analisadas as principais formas de seu reuso e reciclagem, com destaque para a incorporação em massa asfáltica.

2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

Este trabalho possui como objetivo **avaliar** as alternativas de reciclagem de pneus e apresentar o impacto ambiental decorrente do descarte de pneus inservíveis, visando levantar informações que possam levar a uma diminuição do número de pneus dispostos incorretamente e incentivar a reutilização. Um destes métodos de reciclagem, a incorporação do pneu em massa asfáltica, será estudado em maior profundidade, a fim de levantar informações a respeito do seu potencial para aplicação.

Como justificativas, visa incentivar a reutilização de pneus principalmente em processos que não envolvam a sua queima (e consequente emissão poluentes), diminuição dos impactos ambientais causados pelo descarte incorreto, diminuição do consumo de petróleo e consequentemente das vantagens proporcionadas pelo reuso dos pneus, tanto para o meio ambiente quanto para a sociedade.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Pneus

São produzidos cerca de 1,5 bilhões de pneus por ano em todo o mundo, sendo as empresas Bridgestone, Michelin e Good Year as maiores produtoras. Segundo a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), no Brasil foram vendidas aproximadamente 52 milhões de novas unidades em 2020. Ainda segundo a ANIP, em 2017, foram coletados cerca de 90 milhões de unidades para a posterior reciclagem, sendo que foram produzidos 71 milhões de pneus, ou seja, a coleta de pneus inservíveis ultrapassou cerca de 20% o número de unidades novas produzidas [3].

A Associação Brasileira de Importadores e Distribuidores de Pneus (ABIDIP) estabelece que as revendedoras de pneus devem realizar a coleta e o armazenamento temporário de pneus inservíveis em galpões cobertos e fechados ou em contêiner - de forma que o descarte não seja feito incorretamente como vem sendo observado em margens de rios, em terrenos

baldios, lixões, entre outros - para que possam ser direcionados para a reciclagem ou para um ponto de coleta [2].

Os pneus são compostos por borracha natural ou borracha sintética, aço, negro de fumo, enxofre (agente vulvanizador), antidegradantes, óxido de zinco e ácido esteárico, aceleradores e retardadores além de outros aditivos de processo. Sendo assim, com a disposição incorreta, teremos a formação de resíduos potencialmente danosos à saúde pública e ao meio ambiente, sendo necessário evitar este problema encontrando soluções à sua destinação final [5].

Feita a coleta, o pneu deve ser destinado a uma das alternativas para seu reuso. Uma delas é a reforma, que possibilita o reuso do pneu usado. Segundo a Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus - ABR (2015), cada unidade reformada gera uma economia de 50 L de petróleo para a produção de um pneu de carga e 18 L quando para um pneu de passeio, que seriam utilizados na construção de um pneu novo, reduzindo cerca de 80% do volume de petróleo utilizado para a produção desses novos pneus, fazendo com que haja uma redução de 1.630 bilhões de metros cúbicos de CO₂ emitidos para a atmosfera. O pneu reformado apresenta mesmo rendimento quando comparado a um pneu novo, porém não pode ser realizado indefinidamente, visto que, com a reforma, a estrutura não é substituída, tornando-se inservível após realizado o processo de 1 a 3 vezes [5].

3.2 Aspectos ambientais do descarte inadequado

O descarte inadequado de pneus inservíveis constitui um dos mais graves problemas ambientais e de saúde pública no contexto urbano. Com o significativo volume associado com a sua alta durabilidade, o descarte inadequado impacta o meio ambiente, seja pelo ar, pela água ou pela terra. Em aterros, quando o pneu fica completamente coberto, sua baixa compressibilidade faz com que ocorra a retenção de gases e ar em seu interior, tornando-o volumoso e fazendo com a probabilidade de flutuar para superfície aumente, quebrando a cobertura do aterro e causando sua exposição a vetores. Além disso, possibilita que os gases escapem para a atmosfera e o vazamento de líquidos, podendo impactar na qualidade do solo e do lençol freático [6].

Quando dispostos em áreas extensas de grandes depósitos de pneus, ficam sujeitos à queima acidental ou provocada, causando prejuízos tanto para a qualidade do ar quanto para águas superficiais e subterrâneas devido à liberação de substâncias tóxicas. Os subprodutos que acarretam em maior contaminação ao meio ambiente durante a queima dos pneus são os óleos pirolíticos e as cinzas. Com as reações de pirólise derivadas da queima de pneus, é produzido um alcatrão oleoso, composto de uma mistura de nafta, benzeno, aminas e tolueno, além de metais como o níquel, o cádmio, o zinco e o cromo. Quando tenta-se combater a queima, a água utilizada serve como transporte para estas substâncias, contaminando o solo e o lençol freático [7].

Sua deposição em corpos d'água causa problemas como enchentes, provocadas por pneus abandonados em córregos e rios que impedem a vazão da água, além de alterar o habitat de animais que dependem dos mesmos. Um exemplo é o rio Tietê, que passa por um serviço de desassoreamento e de onde, desde 2008, são retirados cerca de 10.000 pneus inservíveis ao ano, tanto do seu interior quanto de suas margens [6].

3.2.1 Consequências sanitárias

Com a deposição em terrenos baldios, lixões e aterros, os pneus ficam a céu aberto. Com as condições de umidade e temperatura, devido à chuva e à absorção da luz solar, esses pneus inservíveis tornam-se criadouros do mosquito *Aedys aegypti*, transmissor da dengue, chikungunya, febre amarela e zika; além do mosquito *Anapholes*, transmissor da malária. Como não existem predadores naturais de mosquitos nas pilhas de pneus, ocorre o aumento populacional desta espécie [8].

Desta forma, com o transporte de um ponto ao outro de pneus inservíveis para a destinação final, sendo intermunicipal ou interestadual, há movimentação de vetores de doenças, entre elas a dengue e a febre amarela. Com isso, a vigilância sanitária aprovou ações e inspeções de campo para o controle e prevenção da dengue e planejou um roteiro para inspeção dos postos de coleta de resíduos não perigosos, como os ecopontos que estocam de forma temporária os pneus inservíveis. Desta forma, os pneus devem ser examinados pelos funcionários da vigilância, a fim de verificar a existência de água no seu interior, se os pneus

estão armazenados em área coberta, ventilados e protegidos das chuvas. Portanto, para o transporte dos pneus inservíveis, deve-se garantir que seja feito por caminhões cobertos para não permitir, em caso de chuva, o acúmulo da água no interior dos pneus [6].

3.3 Reciclagem e reuso de pneus inservíveis

A Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) criou em março de 2007 a Reciclanip, uma iniciativa para a coleta e destinação de pneus inservíveis no país, reunindo mais de 1.000 pontos de coleta no Brasil. Essa iniciativa permitiu que o programa de coleta se tornasse mais expressivo, sendo que em 2014 a coleta obteve um crescimento maior que 1.000% quando comparado ao ano 2000. Este aumento está diretamente ligado à ampliação do número de pontos de coleta de pneus [8].

Há diversas aplicações na área da engenharia para os pneus inservíveis a serem reciclados, nas formas granulada ou fragmentada. Podem ser aplicados em materiais de enchimento de peso leve, composteiras e enchimento de aterros. Ainda é possível sua utilização na forma inteira, sem necessidade de passar pelo processo de trituração, como no caso de muros de contenção, suporte de base de estradas, sistemas de drenagem de gases em aterros sanitários, controles de erosão, diques, guard rails de pistas esportivas, barragens entre outros [5].

Essas aplicações serão apresentadas nas seções seguintes, sendo que em 3.3.1 será discutida a trituração dos pneus, processo muito importante e fundamental que permite a utilização dos mesmos das mais variadas formas, que também serão discutidas posteriormente.

3.3.1 Trituração

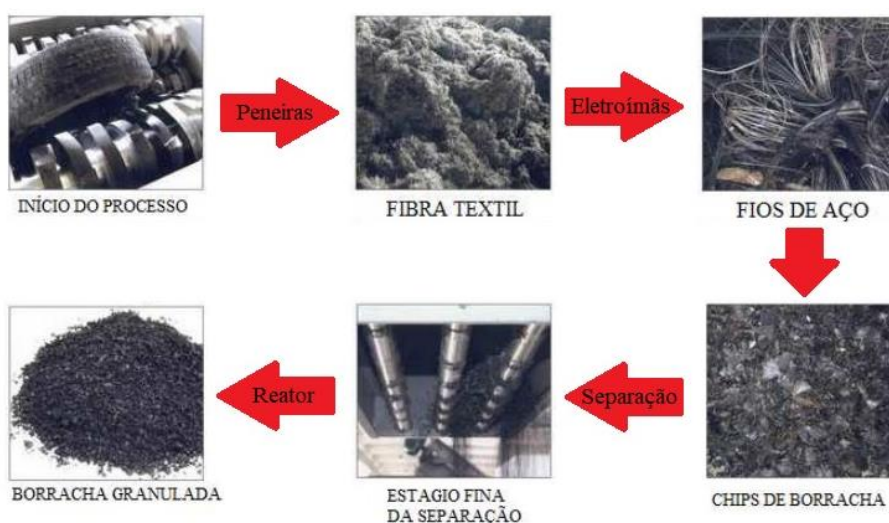
Feita a coleta, os pneus são triturados e ocorre a separação do aço, que é destinado para a reciclagem na indústria siderúrgica. A trituração dos pneus ocorre por meio do processo mecânico ou do processo criogênico. O processo mecânico é realizado em temperatura

ambiente e as partículas de borracha passam por vários estágios de trituração, diminuindo progressivamente de tamanho. O aço contido nas bandas de rodagem da borracha dos pneus é retirado pelo auxílio de eletroímãs, e as fibras da lona são retiradas por peneiramento. O processo mecânico apresenta um custo reduzido, é mais simples e flexível quando comparado ao criogênico, além da borracha deste processo ter características físicas superiores, já que a borracha não enrijece da mesma forma quando sua temperatura é reduzida [9].

No processo criogênico os pneus são congelados, fragilizando a borracha do pneu, posteriormente passada por moinhos de martelo que reduzem as partículas a tamanhos finos ou superfinos [9].

Os pneus inservíveis triturados entram em um reator, para que ocorra a separação do óleo e do negro de fumo, que posteriormente serão utilizados pela indústria de artefatos de borracha. Além disso, o óleo é comercializado como combustível, que pode ser utilizado em motores de combustão interna, em turbinas, e outras aplicações. Dentre as formas de reutilização, as mais visadas são a recauchutagem, a utilização como combustível, a transformação em artefatos de borracha e na composição da massa asfáltica. Estas são descritas brevemente nas seções 3.3.2 a 3.3.6. [9].

Figura 1 – Fluxograma do processo mecânico de trituração da borracha



Fonte: Autoria própria

3.3.2 Recauchutagem

O processo de recauchutagem é a reconstrução do pneu através da substituição da banda de rodagem e dos ombros. Consiste na remoção da banda de rodagem desgastada da carcaça do pneu para que, através de um novo processo de vulcanização, se coloque uma nova banda de rodagem. Existem dois processos para a recauchutagem dos pneus: o processo a frio, um método mais eficiente e simples, utilizando menor energia para a reforma; e a recauchutagem a quente, que demanda menos espaço e oferece um ganho de produtividade, porém necessita passar novamente pelo processo de vulcanização [5].

O processo a frio utiliza bandas pré-curadas que são coladas nas carcaças (com o auxílio de coxins e cordões de borracha para preencher danos estruturais do pneu) após os reparos das mesmas. Já na recauchutagem a quente é utilizada uma manta de borracha, na qual é necessária a utilização de moldes para a vulcanização para então serem realizados os sulcos e desenhos da banda de rodagem [7].

3.3.3 Combustível

Os pneus podem ser usados como combustível para a produção de energia elétrica e também como carga nos fornos clínter da indústria cimenteira. No caso da produção de energia elétrica, o pneu é queimado, produzindo calor que é usado para transformar água líquida em vapor, que irá acionar uma turbina geradora, eliminando o pneu inservível e promovendo a produção de energia elétrica. Com a queima de 14.000 toneladas por ano, consegue-se gerar energia elétrica suficiente para alimentar cerca de 8.500 residências durante um ano. Já na indústria cimenteira, o pneu previamente triturado e estocado em silos é levado por roscas transportadoras para alimentar o maçarico do forno – incorporado ao carvão ou óleo combustível, em elevada temperatura de queima e tempo de residência dos gases dentro do forno - ou a caixa de fumaça, onde há duas comportas contra - peso impedindo a entrada de ar externo ao processo e a saída de gases quentes, possibilitando grande flexibilidade ao tamanho de partícula e à consistência do resíduo. Os gases gerados pelo processo contêm particulados e metais pesados que são prejudiciais ao meio ambiente, por isso são utilizados filtros manga e precipitadores eletrostáticos a fim de impedir que partículas e gases sejam emitidos para a

atmosfera, proporcionando redução do aquecimento global, onde os gases gerados causam influência no efeito estufa e, com a sua redução, diminuem o impacto ambiental decorrente do processo [10].

3.3.4 Artefatos de borracha

Com a reciclagem do pneu inservível, triturado pelos processos descritos anteriormente na seção 3.3.1 e em diferentes granulometrias, é possível confeccionar diversos itens, como tapetes, mantas de grama sintética utilizadas em pisos de quadras esportivas, forrações termo acústicas para estúdios, pisos industriais e antivibratórios intercalados por mantas de borracha, solados de sapato, entre outros. É possível fabricar diferentes itens dependendo da granulometria do material, como por exemplo, partículas finas são utilizadas para enchimento de campos desportivos com grama sintética, se passarem por uma prensa, consegue-se a fabricação de tapetes, entre outros. [9]

3.3.5 Utilização do pneu inteiro como forma de reaproveitamento

Os pneus inservíveis também podem ser utilizados em sua forma inteira como alternativa de reciclagem. Dentre os exemplos, podem ser citados:

- **Muros de arrimo/contenção:** camadas horizontais de pneus espaçadas verticalmente e interligadas com alças de metal, formando camadas de pneus que são preenchidas com solo, evitando que ocorra desabamentos e a erosão do solo;
- **Recifes artificiais:** pneus de carros e caminhões empilhados em um número de 15 a 25 unidades são comprimidos, “aglomerados com uma mistura de cimento e então lançados sobre o leito do mar para formar recifes artificiais”, auxiliando na criação e reprodução de animais marinhos,

criando um habitat favorável, de forma a propiciar novo desenvolvimento da fauna e da flora, e;

- **Armazenamento de água para gramados:** os pneus são cortados ao meio e dispostos em camadas sob gramados de campos de golfe e futebol. Auxilia na redução de gastos com irrigação artificial e fertilização do gramado, pois com a utilização deste sistema, consegue-se garantir boa drenagem do gramado e, com o armazenamento, utiliza-se a água da chuva. [9]

3.3.6 Massa asfáltica

Uma das formas de reciclagem de pneus que mais vem sendo estudada é a sua incorporação nas misturas de asfalto-borracha. Em países como Estados Unidos, sua utilização já vem sendo empregada em projetos para a recuperação da eficiência estrutural de pavimentos degradados e na formação de novas camadas de pavimentos, além de serviços de manutenção corretiva. No Brasil, empresas responsáveis pelas rodovias realizaram testes em trechos de estradas nos estados onde, em São Paulo, foram pavimentados 37 quilômetros com a utilização do asfalto-borracha na Rodovia Anhanguera (entre Araras e Conchal), utilizadas 10 toneladas de pneus inservíveis triturados com proporção de 20%, onde a cada quilometro pavimentado são utilizados cerca de 600 a 1000 pneus inservíveis [10].

Nas misturas asfálticas, existem dois tipos de processamento para inclusão da borracha de pneu: o processo úmido e o processo seco. No processo úmido são adicionadas partículas de borracha ao ligante (CAP), de forma a obter o novo ligante asfalto-borracha. Já no processo seco, as partículas de borracha substituem parte dos agregados pré aquecidos. Após a adição do ligante forma-se um concreto asfáltico modificado pela adição da borracha [11].

Com a adição dos pneus à massa asfáltica, é possível reduzir a espessura da camada do pavimento ao mesmo tempo que se aumenta a vida útil quando comparada com o asfalto convencional. Também proporciona um retardo na propagação de trincas, redução da espessura da camada aplicada, redução de ruído e também a redução de manutenção do pavimento.

O processo de aplicação do asfalto-borracha não apresenta diferenças significativas em relação ao asfalto convencional; a principal diferença se dá na temperatura de resfriamento, já que o asfalto-borracha esfria mais rapidamente, sendo necessário um transporte mais cuidadoso.

Os benefícios sanitários, econômicos e ambientais residem na possibilidade de dar uma destinação aos pneus inservíveis descartados incorretamente, devido ao seu volume dificultar sua estocagem, gerando sérios riscos para o meio ambiente, pela degradação lenta e pela facilidade dos pneus a entrarem em combustão [7].

A incorporação de pneus inservíveis na massa asfáltica foi o processo selecionado para detalhamento neste trabalho, visto que há possibilidade de melhora das propriedades do asfalto convencional, benefícios ambientais com a redução de pneus descartados incorretamente que também proporcionam benefícios sociais.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foram feitas pesquisas referentes aos pneus inservíveis, seu impacto ambiental, sua disposição final, os problemas causados pelo seu descarte incorreto na sociedade e suas possíveis formas de reaproveitamento e reciclagem, visando a preservação ambiental, desenvolvimento sustentável e tecnológico. Por meio das alternativas que foram discutidas, notou-se a grande viabilidade da utilização dos pneus inservíveis incorporados na massa asfáltica.

Foram analisados os meios de processamento em que o pneu inservível é submetido, formas em que o material pode ser processado, os materiais envolvidos no processo e os parâmetros que são utilizados. Também serão evidenciadas as vantagens e desvantagens da incorporação do pneu na massa asfáltica e a variação nas suas propriedades.

Este trabalho foi dividido em três etapas: **Etapla 1:** Na revisão da literatura foi apresentada a problemática do descarte de pneus inservíveis no meio ambiente e apresenta alternativas para sua reutilização, sendo selecionada uma delas para posterior detalhamento. A **Etapla 2** apresenta a análise das vantagens e propriedades do asfalto-borracha sobre o asfalto

convencional. Por fim, a **Etapa 3** apresenta as características do processo de produção e impactos na qualidade, além do potencial de aplicação de pneus inservíveis na fabricação do asfalto borracha.

Todos os dados apresentados e analisados foram retirados de livros, artigos e teses referentes à área.

5. DISCUSSÃO

5.1 Obtenção do asfalto borracha

5.1.1 Considerações iniciais

O asfalto é um material aglutinante, constituído por misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis de elevada massa molecular. Derivado da destilação do petróleo nas refinarias, é chamado de cimento asfáltico de petróleo (CAP) e possui características próprias para uso direto nas misturas asfálticas, devido à sua impermeabilidade, durabilidade, flexibilidade, alta resistência a deformações permanentes e flexibilidade térmica, de modo a suportar carregamentos em diferentes condições climáticas. As misturas convencionais podem ter suas propriedades melhoradas com a adição de aditivos ou agregados, sendo a incorporação de borracha de pneu moída umas das alternativas mais estudadas e avaliadas para a utilização em revestimentos asfálticos [12].

O bom desempenho da borracha como aditivo para melhorar o desempenho do CAP depende da compatibilidade entre eles, onde os óleos aromáticos utilizados presentes no ligante determinam esta compatibilidade, permitindo também a diminuição da viscosidade do ligante asfalto-borracha [12].

Os materiais poliméricos com alto peso molecular apresentam variações de volume quando imersos em materiais com baixo peso molecular. Na incorporação com o cimento asfáltico, as partículas de borracha aumentam até cinco vezes o seu volume absorvendo os óleos aromáticos contidos no cimento asfáltico, alterando propriedades como a ductilidade,

viscosidade e suscetibilidade térmica. Já para o CAP, inibidores de raios UV e antioxidantes são transferidos pelo negro de fumo ao asfalto, tornando-se um material mais resistente à fissuração e ao envelhecimento, proporcionando maior durabilidade ao pavimento [13].

5.1.2 Ligantes asfálticos

Na pavimentação, o ligante asfáltico deve ser aquecido a temperaturas maiores que 100°C para atingir a viscosidade adequada à mistura e adicionados solventes derivados de petróleo para melhorar a sua trabalhabilidade. Podem ser classificados em: cimento asfáltico de petróleo (CAP), asfalto diluído de petróleo (ADP) e emulsão asfáltica [14].

Os ligantes asfálticos são submetidos a grandes variações de temperatura e carregamento, devendo suportar a deformação imposta pelo tráfego, onde a altas velocidades de rolamento, a temperatura é mais elevada e, em baixas velocidades, a carga é aplicada por mais tempo, aumentando a resistência à deformação que o ligante deve suportar [14].

Portanto, o desempenho da mistura asfáltica depende das propriedades do ligante, podendo ser adicionados aditivos como agentes melhoradores de adesividade, polímeros, agentes rejuvenescedores e, principalmente, borracha moída de pneus inservíveis, visando a melhora de suas propriedades físicas, químicas e mecânicas [14].

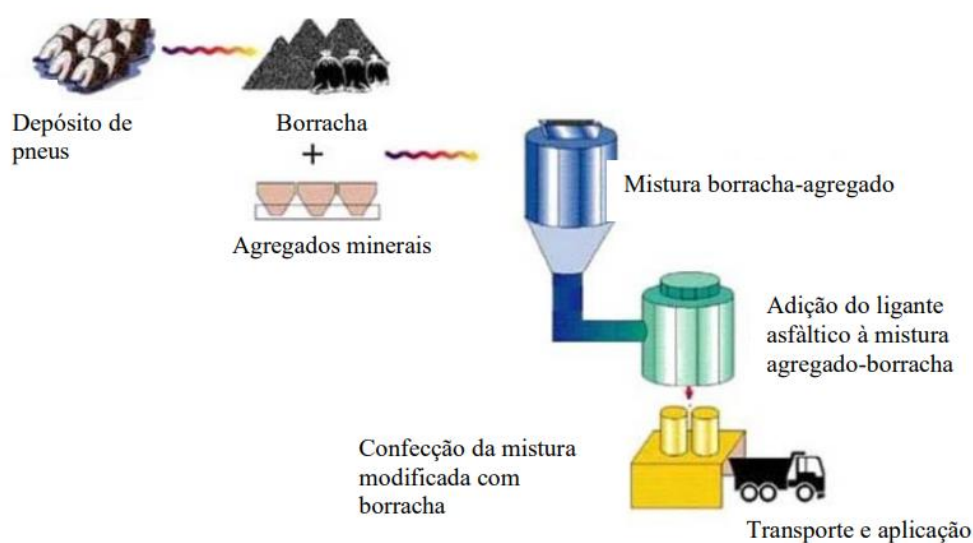
5.1.3 Processo seco

No processo seco, a introdução da borracha nas usinas de asfalto ocorre junto ao processo de preparação da mistura asfáltica, acrescentando partículas secas de borracha granulada aos agregados minerais pré-aquecidos. Neste processo, pedaços sólidos de borracha são adicionados como substituição entre 3 a 5 % da massa total de agregado, com partículas entre 1,6 e 6,4mm, sendo posteriormente adicionado o ligante betuminoso a esta composição final. A quantidade de borracha consumida nesse processo chega a ser 2 a 4 vezes maior que pelo processo úmido [12].

A interação existente entre o ligante e a borracha é muito pequena, comparada ao processo úmido. Aditivos como e inibidores de raios ultravioletas presentes na borracha não chegam a ser transmitidos para o asfalto, sendo um dos motivos de estados americanos optarem pela utilização apenas do processo úmido.

A produção da mistura asfáltica do processo via seca é logisticamente mais simples que a do processo via úmida, além de poder atingir um mercado maior, com custo inicial de aplicação do produto menor, não requerendo modificações nas usinas de asfalto. Têm-se também como vantagem a redução de ruído produzido (50 a 80%), a melhora da resistência à fadiga e a redução de trincamento térmico, além do maior consumo de borracha de pneus, comparado com o processo via úmida, resultando em um maior benefício ambiental [13].

Figura 2 - Processo seco para a modificação das misturas asfálticas com borracha



Fonte: NETO, 2004

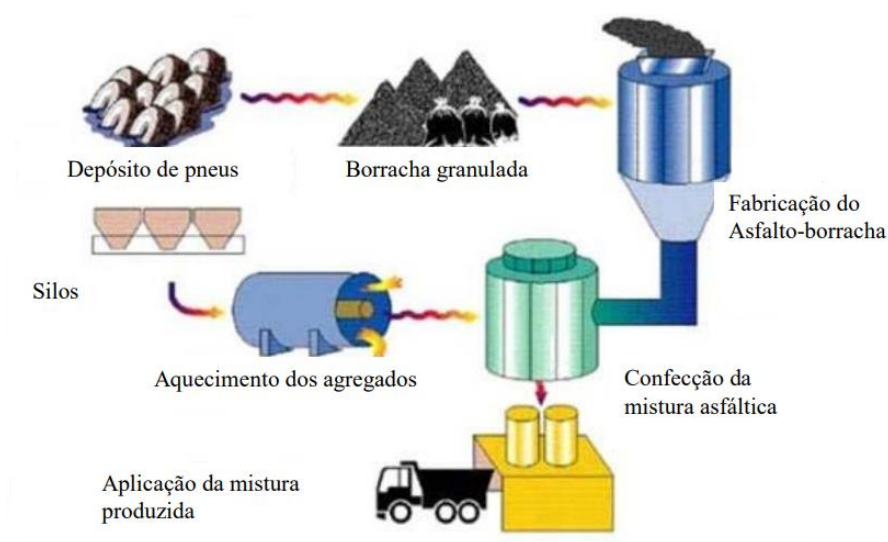
5.1.4 Processo úmido

No processo por via úmida, a borracha é previamente misturada ao ligante, podendo variar de 5 a 25% da massa total de ligante asfáltico, com partículas geralmente inferiores a 2mm, aquecido por volta de 180 °C, transportado em seguida para um tanque de mistura apropriado, onde é adicionada a borracha granulada ao asfalto convencional previamente

aquecido. O processo de mistura é facilitado por uma palheta giratória no interior do tanque de mistura, onde o processo de interação entre o ligante asfáltico e a borracha granulada ocorre em um tempo de uma a quatro horas. O processo de modificação do ligante depende de fatores como granulometria da borracha, temperatura de reação, tipo de CAP, proporção CAP $\times$ borracha [15].

No processo úmido, algumas modificações na usina como dimensões de bombas e encanamento e proteção térmica devem ser realizadas, devido à alta viscosidade dos ligantes. O tempo de processo pode variar de acordo com a granulometria das partículas de borracha e a interação do mesmo com o asfalto borracha. Há uma instabilidade do ligante asfáltico no caso da estocagem após o processo de obtenção por via úmida, ocorrendo a separação do ligante e da borracha, tornando-se uma desvantagem do processo. Portanto, deve-se utilizar o asfalto borracha o mais rápido possível a partir do momento em que foi produzido. Já como vantagem, no processo úmido ocorre uma transferência mais efetiva das características da borracha, aumentando as suas propriedades, tais como a elasticidade, resistência à fadiga, menor envelhecimento do CAP e resistência à ações químicas de combustíveis e óleos [13].

Figura 3: Processo úmido para fabricação dos asfaltos-borracha



Fonte: NETO, 2004

5.2 Interação asfalto borracha

Na interação asfalto borracha, ocorrem mudanças físicas e químicas que fazem com que a mistura apresente propriedades significativamente distintas da mistura com o ligante convencional. A compreensão dessa interação permite que se obtenha maior controle sobre as suas propriedades, tais como a viscosidade, sendo um fator crítico, devido ao fato de que altas viscosidades comprometem a compactação da mistura asfáltica, afetada também pela temperatura de trabalho, onde uma maior temperatura oferece menor viscosidade, diminuindo o volume de vazios e aumentando a durabilidade do asfalto borracha [16].

Os dois principais mecanismos de interação que afetam as propriedades do asfalto borracha durante sua produção são o inchamento das partículas e a degradação, que pode ocorrer por desvulcanização e despolimerização, provenientes de diferentes combinações de temperatura e tempo de interação [12].

O inchamento é um processo de difusão, podendo ocorrer tanto em elevadas temperaturas como em baixas. Resulta em virtude da absorção de componentes leves do ligante asfáltico, a partir da penetração de solvente nas partículas de borracha, aumentando suas dimensões de duas a três vezes, até que a concentração de solvente seja uniforme e se estabilize, reduzindo a distância livre entre partículas. Com isso, uma nova estrutura, composta de ligante asfáltico e partículas de borracha inchadas se desenvolve. O teor de negro de fumo presente na borracha também pode afetar as taxas de inchamento, onde pode ocorrer a diminuição linear do inchamento com a concentração de negro de fumo na borracha [12].

Na desvulcanização acontece a quebra das ligações cruzadas carbono-enxofre responsáveis pela cura da borracha, formadas durante o processo de vulcanização. A despolimerização é a quebra das cadeias poliméricas (ligação carbono-carbono), amolecendo as partículas de borracha de maiores dimensões imersas no ligante e posterior inchamento. Induzida por temperaturas elevadas, a despolimerização é ocasionada pela completa digestão das partículas menores de borracha, reduzindo parcialmente a elasticidade da borracha, gerando um produto mais homogêneo com melhores propriedades de compactação e menor tendência de separação [16].

5.3 Granulometria

A granulometria dos agregados é um fator fundamental na definição das propriedades das misturas asfálticas, influenciando principalmente a durabilidade, vida em fadiga, permeabilidade, estabilidade, trabalhabilidade, aderência, rigidez e resistência à umidade. Para atingir os parâmetros desejados, deve-se garantir uma distribuição de agregados que proporcione uma maior acomodação entre eles, resultando em maior intertravamento do esqueleto mineral. Além disso, partículas mais grossas alteram as propriedades do ligante asfáltico mais que as partículas finas, com maior efeito sobre a rigidez da massa asfáltica, devido à maior resistência ao fluxo imposta pelas partículas grossas [16].

Para representar a distribuição de agregados na mistura, utiliza-se a curva granulométrica, relacionando o peso ou o volume total da mistura. No caso do asfalto borracha, devido ao valor distinto de massa específica do agregado graúdo (Borracha - $1,011\text{g/cm}^3$; agregado - $2,635\text{g/cm}^3$), deve-se fazer a correção de massa por volume [17].

A maior parte das misturas especificadas requerem uma distribuição contínua ou bem graduada. Para isso, classificam-se as graduações por duas formas: volume de vazios da mistura e continuidade da curva granulométrica.

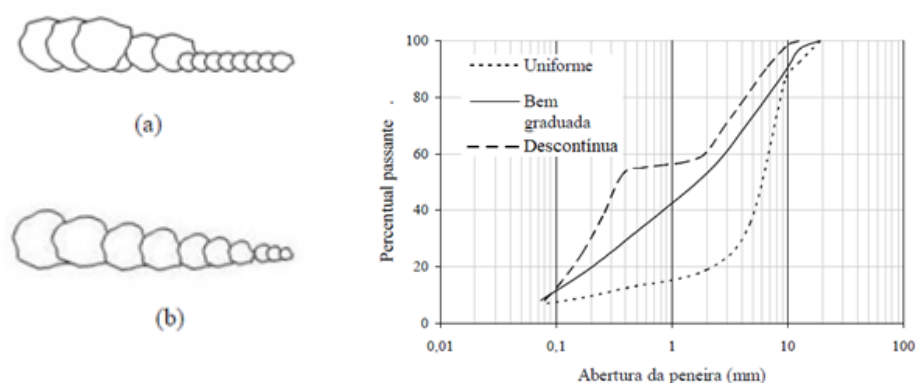
5.3.1 Volume de vazios

Têm-se duas formas de análise do Volume de Vazios, misturas densas (volume de vazios baixo – 4% v/v) e misturas abertas (volume de vazios elevado – 20% v/v). As misturas densas apresentam uma distribuição granulométrica com volume de vazios reduzido, com maior intertravamento entre agregados, evitando que ocorra a penetração de água. Já as misturas abertas, apresentam volume de vazios elevado entre seus agregados, reduzindo a resistência à deformação e gerando maior probabilidade de ocorrência de trincas. Porém, permite um maior escoamento de água, sendo de grande utilidade em locais com alta precipitação, evitando a aquaplanagem e absorção de ruído [17].

5.3.2 Continuidade da curva granulométrica

Quando se analisa gráficos de granulometria, são consideradas misturas contínuas as que apresentam distribuição sem predomínio de material em qualquer fração, enquanto que as misturas descontínuas (*gap*, aberta) possuem um certo desequilíbrio nos tamanhos de partículas, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema de granulometrias de agregados



Fonte: PINHEIRO, 2004

Outro fator que também exerce grande influência nas propriedades das misturas é a quantidade de ligante asfáltico na granulometria utilizada. Um preenchimento adequado dos vazios com o ligante promove o maior intertravamento do esqueleto mineral e proporciona maior resistência à tração e à deformação permanente. Já em misturas com menor preenchimento (mal graduadas), a compactação dos agregados é dificultada, devido a uma baixa estabilidade, causando elevadas deformações permanentes durante seu desempenho em campo. Portanto, o ligante asfáltico tem a função de conferir coesão e união aos agregados da mistura, elevando a resistência ao cisalhamento e resultando em misturas asfálticas com menores deformações permanentes [17].

5.4 Propriedades do asfalto borracha

Quando comparados os valores de resistência mecânica e módulo de resiliência entre os asfaltos convencionais e o asfalto borracha, é observada uma redução significativa nos seus valores. A resistência à tração diminui cerca de 40% com a adição da borracha. Além disso, há uma redução do módulo de resiliência quando comparados a uma mistura convencional. Isso acontece devido à alta viscosidade da mistura e do teor do ligante, reduzindo o intertravamento entre os agregados. Isso faz com que o asfalto borracha tenha sua flexibilidade aumentada, sendo um ponto importante mas que diminui relativamente sua vida útil. Porém, à medida que as misturas asfálticas envelhecem em pista, a resistência mecânica aumenta, reduzindo sua flexibilidade, aumentando seu módulo de resiliência e, conseqüentemente, sua vida útil [17].

Para a fluência, seus valores aumentam de acordo com o aumento do volume de vazios e, quanto maior o volume de vazios, maior a fluência. A distribuição granulométrica da borracha também influencia os valores de estabilidade e fluência das misturas, onde quanto menor o tamanho das partículas, maiores serão os valores para a fluência. Com valores maiores de fluência, nota-se uma melhoria quanto à elasticidade da mistura asfáltica, onde obtém-se menor probabilidade de propagação de trincas. [12].

Em relação com o asfalto convencional, asfalto borracha apresenta valores melhores de atrito e drenabilidade superficial, garantindo boa visibilidade quando em dias de chuva, além de proporcionar a redução de aquaplanagem, tornando o pavimento mais seguro e confortável. Também foi observada a redução dos níveis de ruído do pavimento, trazendo melhora no desempenho acústico das rodovias [14].

Em misturas asfálticas com graduação densa (18% de borracha), o comportamento do asfalto borracha quanto a resistência à fadiga e resistência à propagação de trincas foi superior ao das misturas com o asfalto convencional devido à maior flexibilidade proporcionada pela adição da borracha às misturas, que também promove maiores valores de resistência às deformações permanentes ao asfalto borracha [18].

Em termos de propriedades a baixas temperaturas, o tipo e a concentração de borracha não causam efeito significativo sobre as propriedades a baixas temperaturas, quando testadas para longos períodos de interação. Borrachas mais finas tendem a ser mais efetivas na

modificação de propriedades a baixas temperaturas que borrachas mais grossas, como por exemplo na reologia do asfalto borracha. A rigidez diminui e a taxa de relaxação aumenta proporcionalmente ao teor de borracha [16].

5.5 Potencial de aplicação

A primeira aplicação do asfalto borracha no Brasil é datada de 2001, na Rodovia BR-116/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 [19].

Segundo a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), existem aproximadamente 100 milhões de pneus abandonados em lixões, aterros sanitários, córregos, lagoas e rios do Brasil. Desta forma, deve-se buscar reduzir ao máximo esse número e, com a aplicação do asfalto borracha, utiliza-se cerca de 600 a 1000 pneus para cada quilômetro pavimentado [20].

A durabilidade varia de acordo com as condições da estrada, somando-se fatores como a temperatura, clima e a intensidade do tráfego, onde 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 [20].

Entretanto, esse tipo de pavimentação é 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, devido ao 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 [21].

Sendo assim, o potencial de aplicação é promissor e, principalmente, sustentável para o mercado aplicando-se à pavimentação convencional técnicas inovadoras com a utilização dos pneus inservíveis, sendo necessária a ampliação de programas comunitários juntamente com órgãos de fiscalização, envolvimento efetivo dos elementos da cadeia produtiva da pavimentação asfáltica (produtores e distribuidores de asfalto, órgãos rodoviários), melhorando a divulgação de projetos na execução de trabalhos voltados ao desenvolvimento do asfalto modificado, fazendo correlações com inovações tecnológicas e objetivando a diminuição do esgotamento de uma fonte não renovável, no caso o petróleo, utilizado tanto para a produção do asfalto convencional quanto para a produção de novos pneus, para que agreguem valor perceptível ao público especializado e gere incentivos cada vez maiores visando a sua vasta utilização no país [20].

6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo discutir os impactos ambientais e alternativas para o descarte de pneus inservíveis, sendo analisado em maior detalhe uma destas alternativas, o uso de pneus em misturas asfálticas. Assim, foram levantadas informações a respeito do efeito da borracha moída de pneu sobre misturas asfálticas convencionais e sobre suas propriedades, de forma a comprovar que o uso de pneus inservíveis na mistura é benéfico tanto para o asfalto como para o meio ambiente, fazendo com que o número de pneus inservíveis que antes seriam descartados incorretamente ao meio ambiente ou que não teriam qualquer utilidade diminua e tenha um destino de reaproveitamento viável, como na utilização em pavimentações.

No tópico da revisão bibliográfica fica evidente a importância do assunto envolvendo pesquisas na utilização de borracha reciclada como material de pavimentação, artefatos de borracha e combustíveis tanto no Brasil como a nível mundial. Tendo em vista os aspectos ambientais, nota-se a melhora de propriedades mecânicas e funcionais quando a borracha é incorporada à mistura asfáltica para a pavimentação.

O uso de partículas com granulometria adequada é essencial e também deve-se considerar o volume de vazios e a distribuição granulométrica de agregados quando comparadas às misturas convencionais, dado que são fatores que exercem extrema influência nas propriedades mecânicas e durabilidade das misturas asfálticas.

Os valores de módulo de resiliência e resistência à tração diminuíram com incorporação de borracha, devido a adição da borracha promover o aumento da flexibilidade da mistura. Porém, as propriedades de fadiga e deformação permanente do asfalto borracha indicam desempenho superior ao concreto asfáltico convencional e com isso a propensão de desenvolvimento de trincas é reduzido e oferece maior durabilidade ao asfalto incorporado com a borracha moída, além de ganhos de atrito, drenabilidade e redução de ruídos.

Pode-se então concluir que o uso de borracha moída proveniente de pneus inservíveis na mistura asfáltica corresponde a uma alternativa ao descarte e à queima, reduzindo os impactos no meio ambiente, o número de pneus descartados incorretamente, assim como para melhora significativa no processo de produção e nas propriedades finais de desempenho do asfalto convencional.

7. REFERÊNCIAS

1. 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.
2. BEDUSCHI, Eliane Fátima Strapazzon; **Utilização de pneus inservíveis na composição da massa asfáltica**. Universidade do Oeste de Santa Catarina; 2014.
3. CHRISTÓFANI, Maria Paula Hêngling; FIORITI, Cesar Fabiano; TSUTSUMOTO, Nayra Yumi; MARTINS, Juliana Furtado Arrobas; **Aspectos ambientais sobre pneus inservíveis**. Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística - Vol. 7 no 1 - Novembro de 2017, Edição Temática em Sustentabilidade.
4. DI GIULIO, Gabriela; **Vantagens ambientais e econômicas no uso de borracha em asfalto**. Inovação Uniemp, Campinas, v. 3, n. 3, junho de 2007.
5. SANTOS, Gustavo Botelhos; **Reciclagem de pneus: Vantagens econômicas e ecológicas**. Trabalho de conclusão de curso; Universidade federal de Uberlândia; 2017.
6. LAGARINHOS, C.A.F.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S.; **Reciclagem de pneus usados no Brasil: Revisão das tecnologias usadas**. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais; 2016.
7. LAGARINHOS, Carlos Alberto F; TENÓRIO, Jorge Alberto S; **Tecnologias Utilizadas para a Reutilização, Reciclagem e Valorização Energética de Pneus no Brasil**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 18, nº 2, p. 106-118; 2008.

8. SIMONETTI, Camila; BAUER, Anderson Leffa; PACHECO, Fernanda; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; **Logística reversa e legislação ambiental dos pneus inservíveis no Brasil**. 9º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos; 2018.
9. ANDRADE, Hered de Souza; **Pneus inservíveis: Alternativas possíveis de reutilização**. Monografia submetida ao Departamento de Ciências Econômicas; 2007;
10. LAGARINHOS, Carlos Alberto Ferreira; **Reciclagem de pneus: coleta e reciclagem de pneus. Co-processamento na indústria de cimento, Petrobrás SIX e pavimentação asfáltica**. Tese de mestrado em Tecnologia Ambiental; Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo; 2004.
11. SILVA, Luzilene Souza; NASCIMENTO, Franci Rose; NOGUEIRA, Marlos Henrique Pires; LIMA, Gleisy Kelly Moreira; SOBRINHO, Demetrius Clemente da Rocha; **Utilização de resíduos de borracha de recauchutagem de pneus na composição de asfalto**. Universidade Federal de Roraima; Revista de Ciência e Tecnologia V.4 n.7; 2018.
12. PILATI, Fernanda; **Análise dos efeitos da borracha moída de pneu e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas**; São Carlos, 2008.
13. DIAS, Márcia Rodrigues; **Utilização de Mistura Asfáltica com Borracha pelo Processo da Via-Seca - Execução de um Trecho Experimental Urbano em Porto Alegre – RS**; Porto Alegre; PPGE/UFRGS, 2005.
14. ODA, Sandra, NASCIMENTO; Luis Alberto Herrmann do; EDEL, Guilherme; **Aplicação de asfalto borracha na Bahia**; 3º Congresso brasileiro de P&D em petróleo e gás; Salvador, 2005.

15. TEIXEIRA, Luan Honório Brasil; ARAÚJO, Otávio Correia Campos; **Estudo das vantagens do asfalto borracha em relação ao asfalto convencional**; TCC – Curso de engenharia civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 46pg. 2018.
16. FAXINA, Adalberto Leandro; **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto borracha**; São Carlos, 2006.
17. PINHEIRO, Jorge Henrique Magalhães; **Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco)**; Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 166fl; 2004
18. 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
19. KLINSKY, Luis Miguel Gutiérrez; FARIA, Valéria C. de ; **Asfalto Borracha: Revisão bibliográfica, avaliação reológica do ligante asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas**; Centro de Pesquisas Rodoviárias da Concessionária Nova Dutra do Grupo CCR para a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT); 2017.
20. NASCIMENTO, Rogéria Mendes do; SILVA, Adeilton Feitosa da; SILVA, Fábio Júlio Melo da; REIS, Maria Mirelle Cassimiro dos; BORGES, Priscilla dos Santos. **Potencial cívico e econômico do asfalto borracha: a relação das empresas asfálticas com a tecnologia e sustentabilidade ambiental**; Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, campus Recife – PE Revista Caravana; 2014

21. Romanelli – Asfalto borracha na pavimentação de rodovias – 28/08/2019. Disponível em: <<https://www.romanelli.com.br> >. Acesso em 29/01/2021