



CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS

*Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL*

Victor Hugo Borges Barbosa

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA BORRACHA DE PNEU NA CAMADA DE REVESTIMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Palmas – TO

2020



CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS

*Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL*

Victor Hugo Borges Barbosa

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA BORRACHA DE PNEU NA CAMADA DE REVESTIMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II elaborado e apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: M.Sc Fernando Suarte Moreno

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecer a minha família, em especial minha mãe Vaneide Gonçalves Borges Barbosa e meu pai Hugo Kherlakian Barbosa, por não terem medido esforços, tanto financeiramente quanto pessoalmente, durante esses 5 anos de faculdade. Para que essa conquista pode-se ser concretizada. Aos meus irmãos, por todas as broncas e conselhos dados. A Deus por ter me guiado até aqui e por sempre me fortalecer nos momentos difíceis.

Ao professor Fernando Suarte Moreno, pela paciência, didática, carisma nas orientações e dedicação durante todo o período de trabalho, repassando seus conhecimentos e experiências da melhor forma possível. Para que pudéssemos concluir mais essa etapa da graduação.

Agradecer também a todo corpo docente do CEULP/ULBRA (Centro Universitário Luterano de Palmas) e aos amigos e colegas, que durante toda a graduação permaneceram presentes, compartilhando todos os momentos bons e ruins dessa trajetória.

RESUMO

BARBOSA, Victor Hugo Borges. **Estudo da utilização de resíduos da borracha de pneu na camada de revestimento de pavimentos flexíveis**. 2020. 55p. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Luterano de Palmas. Palmas - TO.

Este trabalho discorre sobre a **Utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos flexíveis**, com o objetivo de correlacionar resultados extraídos de outros estudos, e estabelecer um comparativo entre eles, através do uso de tabelas. Analisar também esses resultados isolados e classificá-los se são satisfatórios ou não em relação ao modelo convencional. Para o desenvolvimento da pesquisa, se fez necessário o estudo de um conjunto de pesquisas bibliográficas que tinham relação com o tema proposto. Foram escolhidas cinco principais pesquisas praticas para serem apresentadas e comentadas. Dentre elas estão, artigos publicados em revistas, Trabalhos de conclusão de cursos, Dissertação de mestrado e Tese de doutorado. Aborda também os benéficos, técnicos, e ambientais da utilização dos pneus descartáveis, para melhorar as condições de tráfego nas rodovias, estradas e reduzir impactos ambientais causados pela disposição inadequada destes materiais na natureza. Os benefícios colocados foram apresentados na pesquisa de forma sucinta. Tendo como base os trabalhos comparados e algumas outras pesquisas que obtiveram resultados positivos na composição de um pavimento asfáltico. O estudo representativo que se mostrou mais satisfatório em relação comparativo das diversas pesquisas foi a Tese de doutorado de (SPECHT, Luciano Pivoto), não somente por estar com todos os dados da coluna completos, mas sim porque seus ensaios alcançaram melhores resultados. Tornando assim, o modelo que melhor representa este estudo.

PALAVRAS CHAVES: Borracha de pneu. Pavimentos flexível. Pesquisas bibliográficas.

ABSTRACT

BARBOSA, Victor Hugo Borges. **Study of the use of waste tire rubber in the flexible floor covering layer.** 2020. 55p. Conclusion of the Civil Engineering Course at the Centro Universitario Luterano de Palmas. Palmas - TO.

This paper discusses the **use of rubber waste tires on flexible pavements**, with the aim of correlating results extracted from other studies, and establishing a comparison between them, through the use of tables. Also analyze these isolated results and classify them if they are satisfactory or not in relation to the conventional model. For the development of the research, it was necessary to study a set of bibliographic researches that were related to the proposed theme. Five main practical surveys were chosen to be presented and commented on. Among them are articles published in magazines, course completion papers, master's thesis and doctoral thesis. It also addresses the beneficial, technical, and environmental aspects of using disposable tires, to improve traffic conditions on highways, roads and reduce environmental impacts caused by the inappropriate disposal of these materials in nature. The benefits presented were presented in the survey succinctly. Based on the comparative works and some other researches that obtained positive results in the composition of an asphalt pavement. The representative study that proved to be more satisfactory compared to the various studies was the doctoral thesis by (SPECHT, Luciano Pivoto), not only because all the data in the column was complete, but because his essays achieved better results. Thus, making the model that best represents this study.

KEY WORDS: Tire rubber. Flexible flooring. Bibliographic searches.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura do pavimento flexível.	17
Figura 2: Resposta mecânica do pavimento flexível	18
Figura 3: Rodovia pavimenta com CAUQ.....	19
Figura 4: Classificação de resíduos sólidos.....	24
Figura 5 - Estrutura do pneu	26
Figura 6 – Destinação dos pneus inservíveis no Brasil, no período de 2006 a 2011– Destinação dos pneus inservíveis no Brasil, no período de 2006 a 2011.....	28
Figura 7- Planta de produção do concreto asfáltico usinado a quente modificado por borracha (asfalto-borracha)	31
Figura 8 – Pavimentação de rodovias	31
Figura 9 - Fluxograma	34
Figura 10– Localização da jazida e do derrame basáltico	36
Figura 11: Gráfico comparativo dos valores das resistências à tração.....	44
Figura 12: Gráfico comparativo das tabelas de vida de fadiga (13 e 14) em termos de diferença de tensões	48
Figura 13: Resultados dos ensaios de trilha de roda.....	50
Figura 14: Gráfico de Fluência	52
Figura 15: Gráfico de Estabilidade	52
Figura 16: Gráfico de Estabilidade/ Fluência	53
Figura 17: Curvas de fadiga	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Quantidade de pneus produzidos e vendidos no Brasil.....	27
Tabela 2: Valores de estabilidade e fluência da mistura com ligante convencional e com ligantes modificados com borracha.....	40
Tabela 3: Classificação quanto a satisfação dos resultados de acordo com os limites máximos adotados.....	40
Tabela 4: Valores de módulo de resiliência e resistência à tração da mistura com ligante convencional e com ligantes modificados com borracha (T = 25°C).....	41
Tabela 5: Classificação quanto a satisfação dos resultados em relação a mistura convencional.....	41
Tabela 6: Constantes dos modelos de fadiga.....	42
Tabela 7: Classificação quanto a satisfação dos resultados em relação a mistura referência.....	42
Tabela 8: Resumo do ensaio de resistência à tração do Traço 0,7.....	43
Tabela 9: Resumo do ensaio de resistência à tração do Traço 1,1.....	43
Tabela 10: Resumo do ensaio de resistência à tração do Traço 0,4.....	43
Tabela 11: Resumo dos resultados obtidos no ensaio de resiliência da mistura de referência.....	45
Tabela 12: Resumo dos resultados obtidos no ensaio de resiliência da mistura experimental otimizada.....	45
Tabela 13: Resumo dos resultados obtidos no ensaio de vida de fadiga da mistura de referência.....	46
Tabela 14: Resumo dos resultados obtidos no ensaio de vida de fadiga da mistura experimental otimizada.....	47
Tabela 15: Resultados Obtidos nos Ensaio Mecânicos.....	50
Tabela 16: Classificação quanto a satisfação dos resultados de acordo com os limites máximos adotados.....	50
Tabela 17: Classificação quanto a satisfação dos resultados de acordo com os limites máximos adotados.....	53
Tabela 16: Módulos dinâmicos.....	54
Tabela 19: Classificação quanto a satisfação dos resultados em relação a mistura convencional.....	55

Tabela 20: Vantagens e Desvantagens do uso de pneus na composição do pavimento asfáltico	56
Tabela 21: Síntese dos Estudos analisados ao decorrer dessa pesquisa.....	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 OBJETIVOS	15
1.3.1 Objetivo geral	15
1.3.2 Objetivos específicos	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 ESTRUTURA DO PAVIMENTO	16
2.2 CLASSIFICAÇÃO DO PAVIMENTO	17
2.3 PAVIMENTO FLEXÍVEL	17
2.4 BREVE HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DOS PNEUMÁTICOS	19
2.5 REGULAMENTAÇÃO PARA DISPOSIÇÃO DOS PNEUMÁTICOS INSERVÍVEIS	20
2.5.1 Resíduos sólidos – classificação.....	22
2.6 COMPOSIÇÃO, FABRICAÇÃO E ESTRUTURA DO PNEU	24
2.7 PNEUS INSERVÍVEIS E RECICLAGEM.....	27
2.8 UTILIZAÇÃO DA BORRACHA EM MISTURAS ASFÁLTICAS	29
3. METODOLOGIA	33
3.1 DESENHO DE ESTUDO	33
3.2 LOCAL DE PERÍODO DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA	33
3.3 OBJETO DE ESTUDO	33
3.4 INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS E ANÁLISE	34
3.4.1 Levantamento de dados.....	34
3.4.1.1 Levantamento de materiais 1ª pesquisa	35
3.4.1.1.1 Ligantes.....	35
3.4.1.1.2 Agregados.....	35
3.4.1.1.3 Borrachas.....	36
3.4.1.2 Levantamento de materiais 2ª pesquisa	37
3.4.1.2.1 Ligantes.....	37
3.4.1.2.2 Agregados.....	37
3.4.1.2.3 Borrachas.....	37
3.4.1.3 Levantamento de materiais e métodos 3ª pesquisa	38
3.4.1.4 Levantamento de materiais e métodos 4ª pesquisa	38
3.4.1.5 Levantamento de materiais e métodos 5ª pesquisa	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40

4.1 ANALISE DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM INCORPORAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS	40
4.1.1 Ensaios utilizados.....	40
4.2 ANALISE DA UTILIZAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS EM MISTURAS ASFÁLTICAS.....	42
4.2.1 Ensaios utilizados.....	42
4.3 ANALISE DA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA DE PNEUS EM PAVIMENTOS	49
4.3.1 Ensaios utilizados.....	49
4.4 ANALISE DA MISTURA ASFÁLTICA COM INCORPORAÇÃO DA BORRACHA DE PNEU	51
4.4.1 Ensaios utilizados.....	51
4.5 ANALISE DA REDUÇÃO DA ESPESSURA DOS PAVIMENTOS UTILIZANDO MISTURAS COM ASFALTO-BORRACHA.....	54
4.5.1 Ensaios de desempenho.....	54
4.6 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PAVIMENTO MODIFICADO COM BORRACHA DE PNEUS.....	55
4.7 METODO COMPARATIVO DOS ESTUDOS ANALISADOS	57
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
REFERÊNCIAS.....	60

1. INTRODUÇÃO

Um dos vários problemas que a humanidade enfrenta no início do século 21, é o problema de destinação final dos resíduos. Grandes quantidades de borracha usada na confecção de pneus para aviões, caminhões, carros, etc., são descartados quando se tornam inservíveis, isto é, quando eles não têm mais condições de serem reformados (ADHIKARI et al., 2000).

Numerosas pesquisas têm verificado os benefícios de adição de material poliméricos aos ligantes asfálticos. As propriedades esperadas com adição de polímeros são a redução da suscetibilidade térmica e aumento da ductilidade, proporcionando estabilidade em altas temperaturas e reduzindo o risco de fratura em baixas temperaturas. Os polímeros, também podem contribuir para uma maior resistência ao intemperismo e uma melhor adesão ligante/agregado. Vários trabalhos têm sido publicados, nos últimos anos, na literatura internacional, dentre eles Bonemazzi *et al.* (1996), Jacobs *et al.* (1996) e Shin *et al.* (1996). No Brasil destacam-se as pesquisas de Cerratti *et al.* (1996), DNER (1998a), Gonçalves *et al.* (2000), Leito (1999), Silva (2000) e Silva *et al.* (2002).

Este trabalho apresenta uma pesquisa comparativa que busca o entendimento dos fatores influentes no desempenho de misturas asfálticas preparados com a incorporação de resíduo de borracha de pneus de diferentes bibliografias.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O problema da pesquisa se enquadra na necessidade crescente de destinação adequada de resíduos sólidos de pneus, pois sua disposição irregular implica em prejuízos para a sociedade e custos elevados para o poder público. Aliado a isto, verifica-se, “Qual a importância do estudo de resíduos, substituintes nas camadas de revestimento dos pavimentos flexíveis?”

1.2 JUSTIFICATIVA

A reciclagem de resíduos sólidos é um dos problemas mais difíceis de serem resolvidos em todo o mundo, dado o crescimento sem precedentes da população. Segundo Fiksel et al. (2011), como é crescente a preocupação com a sustentabilidade das cadeias de suprimentos industriais, os organismos governamentais e o setor privado estão elevando os esforços para melhorar a gestão dos resíduos sólidos. Dentro desse contexto, o pneu de borracha constitui uma grande parte dos resíduos sólidos e, por esse motivo, transformou-se em uma preocupação ambiental mundial.

No Brasil, desde 2002, os fabricantes e importadores são os responsáveis pela coleta e destinação desse material. A partir da revisão da Resolução CONAMA no 258/99 e aprovação da Resolução no 416/09 houve um crescimento no número de pontos de coleta, empresas de pré-tratamento e valorização energética no país.

O sistema implementado no Brasil é o sistema de retorno com responsabilidade dos fabricantes e dos importadores. O sistema é semelhante ao utilizado pelos países membros da Comunidade Européia, com exceção do pagamento da taxa paga pelos consumidores, no momento da troca dos pneus usados por novos. Os pneus são descartados quando trocados por novos ou quando os carros, caminhões e ônibus chegam ao final da sua vida útil. Em muitos países os pneus são deixados em centros de coleta e os consumidores pagam uma taxa que financia a logística reversa dos pneus usados. A partir deste momento é feita uma triagem, analisando se as carcaças dos pneus têm condição ou não de serem utilizadas no processo de reforma. As que têm condições são encaminhadas às empresas que fazem a recauchutagem, as que não apresentam condições de serem reformadas são encaminhadas para as empresas de reciclagem e valorização energética. No qual diminuem a quantidade de resíduos de pneus descartados, geram emprego e movimentam a economia. Dando assim, uma relevância, social, ambiental e econômica.

Como relevância pessoal, o desenvolvimento desse trabalho se dá como um desafio na sua composição, por não ser um tema estudado de forma detalhada

nas universidades, se faz como uma oportunidade de estudar um pouco mais sobre o assunto.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral estudar o comportamento do pavimento flexível com a utilização de resíduo da borracha de pneu na camada de revestimento, e também estimular o aproveitamento desses resíduos na área de pavimentação, contribuindo para a diminuição de impactos ambientais causados pela disposição inadequada destes materiais na natureza.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar os levantamentos de materiais que serão utilizados para fabricação do pavimento;
- Estabelecer um comparativo de métodos usados em diferentes pesquisas;
- Apresentar o estudo das propriedades físicas e mecânicas do pavimento com resíduos de borracha de pneu;
- Benefícios tecnológicos, econômicos e ambientais na utilização da borracha como resíduo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ESTRUTURA DO PAVIMENTO

De acordo com Balbo (2007) pavimentar uma via propicia o aumento operacional para o tráfego de veículos, através da implantação de uma superfície mais regular e mais aderente, proporcionando aos usuários maior conforto no deslocamento e mais segurança em condições de pista úmida ou molhada.

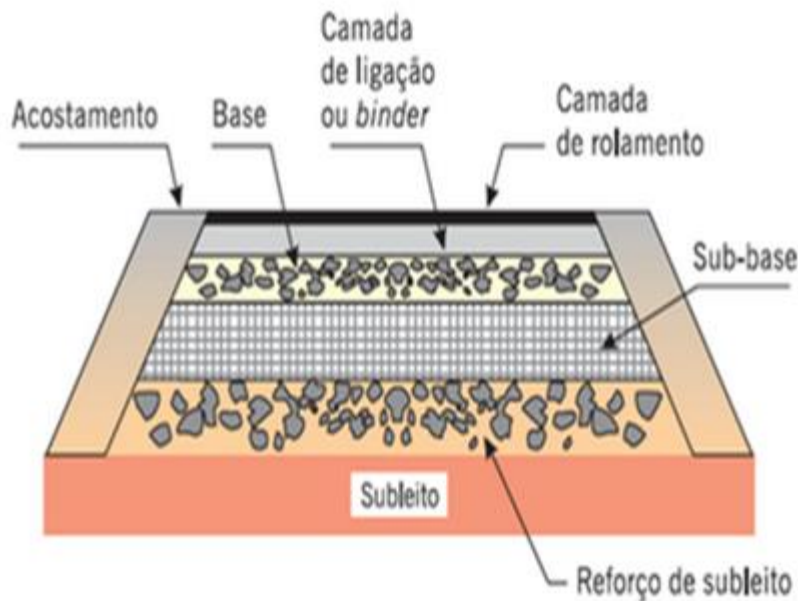
Segundo o DNIT (2006), o pavimento de uma rodovia consiste de uma superestrutura formada por um sistema de camadas de espessura finita, construída após a terraplenagem, destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos, a melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança, e a resistir aos esforços horizontais, tornando mais durável a superfície de rolamento. Essas camadas são divididas em revestimento, base, sub-base, reforço de subleito e subleito.

O glossário de termos técnicos rodoviários (DNER, 2017) as define como:

- Subleito: maciço de terra que serve de fundação para o pavimento ou revestimento;
- Reforço de subleito: camada granular do pavimento executada com o objetivo de melhorar a capacidade de suporte de carga do subleito e de reduzir espessura da sub-base;
- Sub-base: camada corretiva do subleito e complementar à base, com as mesmas funções desta, e executada quando, por razões de ordem econômica, for conveniente reduzir a espessura de base;
- Base: camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os ao subleito, e sobre a qual se constrói o revestimento;
- Revestimento: camada mais acima do pavimento, que recebe diretamente as ações verticais e horizontais dos veículos, e destinada a melhorar as condições do rolamento quanto ao conforto e segurança.

A figuras abaixo ilustra como é constituídas a estrutura do pavimento flexível.

Figura 1: Estrutura do pavimento flexível.



Fonte: Bernucci, 2010.

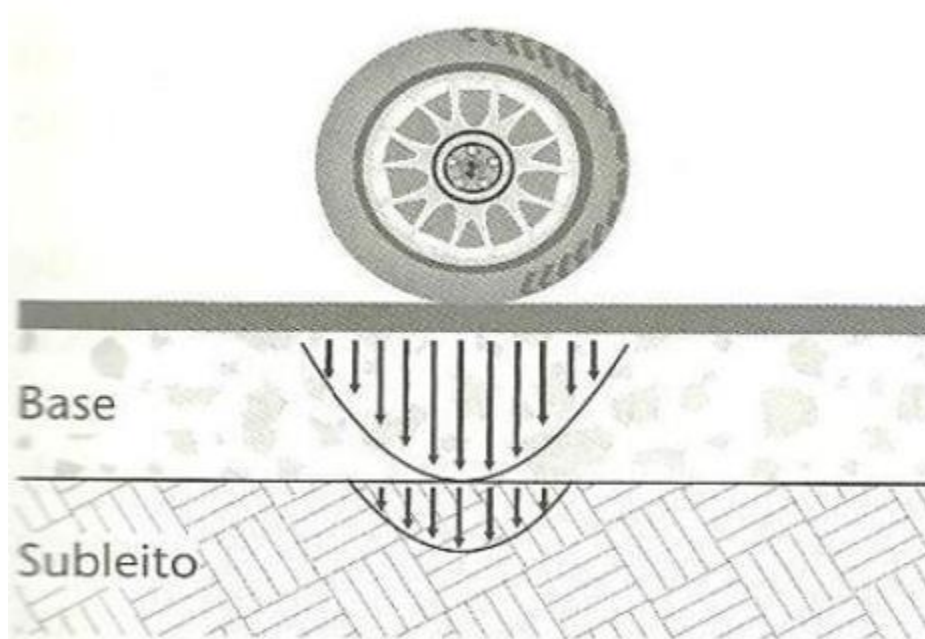
2.2 CLASSIFICAÇÃO DO PAVIMENTO

De forma geral, são conhecidos três tipos de pavimentos. Eles são classificados em pavimentos flexíveis, pavimentos semi-rígidos e pavimentos rígidos, porém esse estudo procura dar ênfase ao pavimentos flexível. (FILHO; ROCHA, 2018)

2.3 PAVIMENTO FLEXÍVEL

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), os pavimentos flexíveis são aqueles compostos por uma camada superficial asfáltica – revestimento, apoiadas em camadas de base, sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem adição de agentes cimentantes, e que sob carregamento sofre deformação elástica em todas as camadas, ou seja, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes e com pressões concentradas.

Figura 2: Resposta mecânica do pavimento flexível



Fonte: Balbo, 2007

Com relação aos materiais utilizados nos pavimentos flexíveis, os agregados correspondem entre 90% e 95% do revestimento, sendo responsável por suportar e transmitir as cargas aplicadas pelos veículos e resistir ao desgaste sofrido pelas solicitações. Já o material betuminoso – asfalto, corresponde entre 5% e 10% do revestimento, tendo função aglutinante e ação impermeabilizante (BERNUCCI et al., 2010).

Dentre os tipos de revestimento dos pavimentos flexíveis, existem as misturas usinadas. Para Bernucci et al. (2010), essa mistura de agregados e ligante é feita em uma usina estacionária, e posteriormente transportada para o local de utilização. Ainda segundo Bernucci et al. (2010), um dos tipos mais utilizados no Brasil é o concreto asfáltico usinado a quente – CAUQ.

Figura 3: Rodovia pavimentada com CAUQ



Fonte: Rodocon, 2017

O CAUQ pode ser empregado como revestimento, camada de ligação – binder, regularização ou reforço do pavimento. O concreto betuminoso somente deve ser fabricado, transportado e aplicado quando a temperatura ambiente for superior a 10°C, e sua execução não é permitida em dias de chuva (DNIT, 2006).

Na Especificação de Serviço do Concreto Asfáltico – 031/2006–ES (DNIT, 2006), os materiais constituintes são o agregado miúdo, o agregado graúdo, o ligante asfáltico e o filer.

2.4 BREVE HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DOS PNEUMÁTICOS

Os pneus de borracha foram inventados em 1845, por R. W. Thomson, depois que o norte-americano Charles Goodyear descobriu, casualmente, o processo de vulcanização da borracha em 1839, ao deixar cair enxofre em uma amostra de borracha que estava sendo aquecida, tornando a borracha mais resistente e elástica. (GOODYEAR, 1999).

A partir da Primeira Guerra Mundial, criou-se na Alemanha a tecnologia para fabricar borracha sintética a partir do petróleo. Apesar de a borracha sintética ser muito parecida com a borracha natural, ela não é tão resistente ao calor e racha com a mudança de temperatura muito rápida. Por isso, os artefatos são sempre constituídos de uma parcela da borracha natural (PETROFLEX, 2001).

As borrachas tornaram-se então substitutos das rodas de madeira e ferro, usadas em carroças e carruagens. A borracha além de ser mais resistente e durável, absorve melhor o impacto das rodas com o solo, o que tornou o transporte mais confortável e funcional. Com o desenvolvimento da indústria automobilística no século XX, o consumo de pneus atingiu números gigantescos, tornando-se fundamental e insubstituível em nossa vida diária, tanto no transporte de passageiros quanto no de cargas (PETROFLEX, 2001).

2.5 REGULAMENTAÇÃO PARA DISPOSIÇÃO DOS PNEUMÁTICOS INSERVÍVEIS

No Brasil, as primeiras iniciativas legislativas para a definição de diretrizes voltadas aos resíduos sólidos surgiram no final da década de 80. Desde então, foram elaborados mais de 100 projetos de lei, os quais, por força de dispositivos do Regimento Interno da Câmara dos Deputados, encontram-se apensados ao Projeto de Lei nº 203, de 1991 (PROJETO DE..., 1991), que dispõe sobre acondicionamento, coleta, tratamento, transporte e destinação dos resíduos de serviços de saúde, estando pendentes de apreciação. Atualmente tramita no Congresso Nacional o Projeto de Lei 1991 com o objetivo de instituir a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PROJETO DE..., 2007). Esse projeto foi encaminhado pelo Ministério do Meio Ambiente e teve a contribuição dos Ministérios das Cidades, da Saúde, do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, do Planejamento, Orçamento e Gestão, do Desenvolvimento Social e Combate à Fome e da Fazenda.

No Brasil, o órgão responsável pela regulamentação, controle e fiscalização do gerenciamento dos pneus usados e inservíveis é o Ministério do Meio Ambiente, que atua por meio do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA e do

Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA.

A resolução CONAMA nº 258/2002 define pneumático inservível como “...aquele que não mais se presta a processo de reforma que permita condição de rodagem adicional...” (BRASIL, 2002a) (Anexo A). Essa resolução trata da destinação final dos pneus inservíveis e determina que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis. Segundo a resolução, em seu Art. 3º, Inciso IV, a partir de janeiro de 2005:

- a) Para cada quatro pneus novos fabricados no País ou pneus novos importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a cinco pneus inservíveis;
- b) Para cada três pneus reformados importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão dar destinação final a quatro pneus inservíveis (BRASIL, 2002a).

Compete ao IBAMA, o controle, a fiscalização e a edição dos atos normativos pertinentes à Resolução 258/2002 do CONAMA (BRASIL, 2002a). A Instrução Normativa nº 8 do IBAMA define que destinadores de pneumáticos inservíveis são aqueles que fornecem uma destinação ambientalmente adequada para pneumáticos inservíveis, inteiros ou processados e que destinação ambientalmente adequada de pneumáticos inservíveis é qualquer procedimento ou técnica, devidamente licenciada pelos órgãos competentes, no qual o pneumático é descaracterizado por meio físico ou químico, podendo haver reciclagem de seus elementos originais ou de seu conteúdo energético (BRASIL, 2002b).

De acordo com a classificação proposta pela NBR 10.004 – “Classificação de Resíduos Sólidos” (ABNT, 2004), o rejeito da borracha seria enquadrado como um resíduo classe II B (inerte), por não conter metais pesados, não sofrer lixiviação e não ser solúvel em água. Apesar disso, a resolução CONAMA nº 23/96, que regulamenta a importação e uso de resíduos perigosos, proíbe a importação de pneumáticos usados, ao estabelecer, em seu artigo 4º, que os resíduos inertes não

estão sujeitos a restrições de importação, à exceção dos pneumáticos usados, cuja importação é proibida (BRASIL, 1996).

Discussões mais aprofundadas sobre o tema podem ser encontradas em Kamimura (2002), Cimino (2004) e Motta (2008).

2.5.1 Resíduos sólidos – classificação

A classificação de resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A segregação dos resíduos na fonte geradora e a identificação da sua origem são partes integrantes dos laudos de classificação, onde a descrição de matérias-primas, de insumos e do processo no qual o resíduo foi gerado devem ser explicitados. A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo deve ser estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem (ABNT NBR 10004, 2004).

Sobre as definições de Resíduos sólidos, Periculosidade e Toxicidade podem afirmar que:

Resíduos sólidos:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT NBR 10004, 2004).

Periculosidade:

Característica apresentada por um resíduo que, em função de

suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, pode apresentar:

- a) risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices;
- b) riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada (ABNT NBR 10004, 2004).

Toxicidade:

Propriedade potencial que o agente tóxico possui de provocar, em maior ou menor grau, um efeito adverso em consequência de sua interação com o organismo seja por inalação, ingestão ou absorção cutânea tendo efeito adverso (tóxico, carcinogênico, mutagênico, teratogênico ou ecotoxicológico) (ABNT NBR 10004, 2004).

Figura 4: Classificação de resíduos sólidos



Fonte: ABNT NBR 10004, 2004

2.6 COMPOSIÇÃO, FABRICAÇÃO E ESTRUTURA DO PNEU

O ciclo de vida útil do pneu tradicional é composto, geralmente, de cinco etapas principais, compreendidas pela extração das matérias-primas, produção, consumo (uso), coleta de pneus usados e, posteriormente, gestão de resíduos gerados por esses pneus, observando-se que essa configuração depende das condições locais de cada país ou região para onde são produzidos ou vendidos (cf. VAN BEUKERING; JANSSEN, 2001).

Os pneus são compostos por diferentes materiais, dentre os quais se podem citar: uma estrutura em aço, náilon, fibra de aramid, rayon, fibra de vidro e/ou poliéster, borrachas natural e sintética, diferentes polímeros, reforçadores químicos, antidegradantes, óleos entre outros (cf. GOMES FILHO, 2007), que mantêm suas propriedades mecânicas mesmo após sua vida útil (cf. SAYÃO *et al.*, 2009).

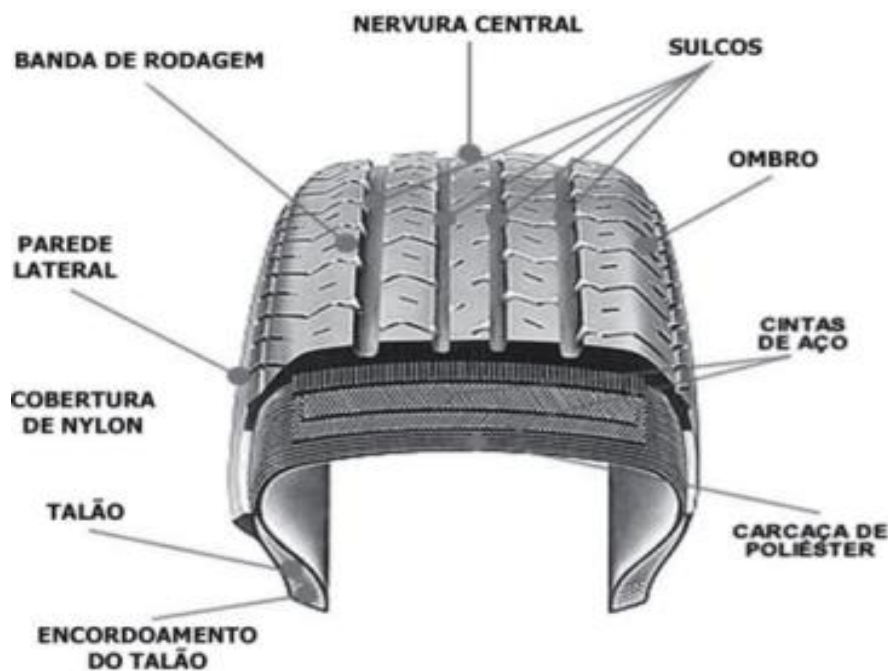
É essencial, na construção dos pneumáticos, a adição de negro de fumo porque deixa a borracha mais resistente e aumenta seu desempenho. Na

vulcanização, a borracha é misturada ao negro de fumo num molde aquecido entre 120° C a 170° C; a eles são adicionados enxofre, compostos de zinco e outros aceleradores de processo (cf. RESENDE, 2004). A borracha vulcanizada é forte, elástica, impermeável aos gases, resistente à abrasão, à ação química, ao aquecimento e à eletricidade (cf. SANTOS, 2002).

As empresas têm investido em pesquisas tecnológicas para atender às diferentes demandas, produzindo pneus com composição e características variadas que diferem em seus processos de produção (cf. NOVICKI; MARTIGNONI, 2000). A mistura composta de borracha varia com a destinação geográfica do pneu. Cada região tem um perfil de demanda que reflete as condições das estradas, o limite de velocidade e o estilo de dirigir da população. A tecnologia adotada e o custo de produção dos pneus dependem do mercado para o qual ele está sendo destinado. As diferenças na composição dos pneus influenciarão tanto em sua durabilidade como em suas formas de reaproveitamento.

O pneu apresenta uma estrutura complexa, formada por diversos materiais que visam conferir as características necessárias ao seu desempenho e segurança. A figura mostra as principais partes que compõem um pneu (BRAZIL TIRES):

Figura 5 - Estrutura do pneu



Fonte: Brazil Tires, 2009

Um pneu, se utilizado de maneira correta, seguindo as especificações, pode rodar em torno de 95 a 128 mil km. Até ser descartado, ele chega a perder 10% de seu peso, sendo que grande parte do material perdido vem da banda de rolagem (cf. VAN BEUKERING; JANSSEN, 2001).

As quantidades de pneus produzidos e vendidos no período de 2007 a 2011, segundo dados da Associação Nacional da Indústria Pneumática – ANIP (2011), são apresentadas na tabela 1, notando-se que as vendas incluem, também, as quantidades de pneus importados. Verificou-se que no período de cinco anos foram vendidos no País 333,5 milhões de pneus, e que uma parte provavelmente já esteja tornando-se inservível e sendo descartada. A quantidade de pneus aqui vendida no período 2007-2011 representa um valor (10%) pouco acima dos pneus descartados (303,23 milhões) nos EUA somente no ano de 2007, conforme a Rubber Manufacturers Association – RMA (2009), e a mesma pesquisa concluiu que, em média, há um descarte de um pneu por pessoa por ano nos EUA (MELLONE; SANTOS e SHIBAO, 2013).

Tabela 1– Quantidade de pneus produzidos e vendidos no Brasil

Tipo	Total 2007 (milhares)	Total 2008 (milhares)	Total 2009 (milhares)	Total 2010 (milhares)	Total 2011 (milhares)	Total Geral
Carga	7319	7367	6034	7735	7449	35904
Caminhonetes	6058	5842	5601	7941	8471	33913
Automóveis	28791	29586	27492	33813	32568	152250
Motocicletas e Motonetas	13725	15250	13000	15205	16079	73259
Outros	1354	1666	1684	2611	2360	9675
Total	57247	59711	53811	67305	66927	305001
Vendas	63100	64200	60200	73100	72900	333500

Fonte: Adaptado da ANIP (2011)

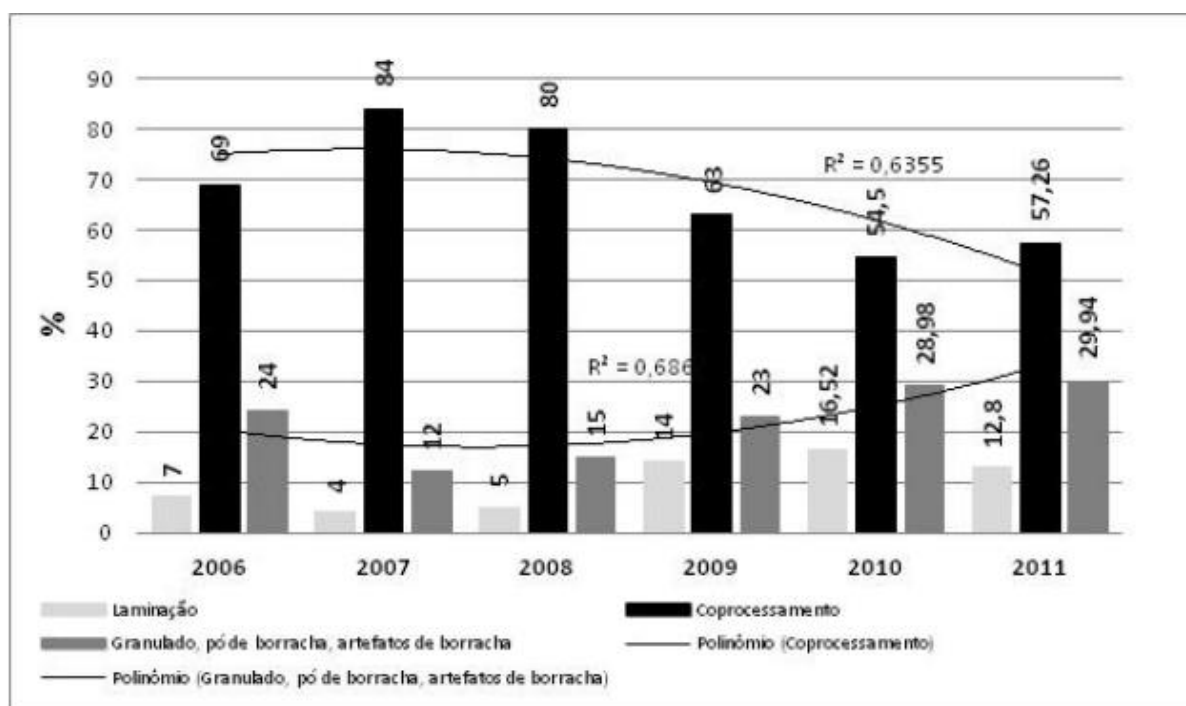
A frota brasileira de veículos, para a qual esses pneus foram produzidos em 2011, era constituída de 34,8 milhões de automóveis, caminhões, comerciais leves e ônibus, 11,6 milhões de motocicletas e 592 mil tratores (cf. SINDIPEÇAS, 2011).

2.7 PNEUS INSERVÍVEIS E RECICLAGEM

Desde 1999 até 2011 foram reciclados no Brasil 2,9 milhões de toneladas, o equivalente a 580,5 milhões de pneus inservíveis de automóveis, com custo para a coleta e destinação de US\$ 0,72 por pneu inservível (LAGARINHOS, 2011).

Com a mudança na forma de reportagem conforme a Resolução CONAMA no 416/09, os fabricantes de pneumáticos em 2010 destinaram: 64%, para o coprocessamento; 32% granulado, pó de borracha, artefatos e aço; 4%, para o processo de laminação. Na Fig. 7 são apresentados os dados de destinação dos pneus pelos fabricantes no período de 2006 a 2009 e conforme os relatórios de pneumáticos do Cadastro Técnico Federal – CTF do IBAMA de 2010 e 2011. Os dados referentes a destinação de pneus pelos importadores no período de 2006 a 2009, não estão disponíveis. Pode-se observar que ocorreu uma redução do envio de pneus inservíveis para o processo de coprocessamento de pneus e aumento da reciclagem de pneus a partir de 2010.

**Figura 6 – Destinação dos pneus inservíveis no Brasil, no período de 2006 a 2011–
Destinação dos pneus inservíveis no Brasil, no período de 2006 a 2011**



Fonte: IBAMA,2010

A regeneração de borracha no Brasil ainda é incipiente, 118,28 toneladas entre outubro de 2009 a dezembro de 2010 e 130,62 toneladas em 2011 (LAGARINHOS, 2011).

No Brasil, 22 cimenteiras coprocessam pneus triturados e inteiros para a Reciclanip, sendo: 40% Votorantim, 37% Grupo Lafarge / Cimpor e 23% Camargo Corrêa. A Tabela 1 apresenta a capacidade de coprocessamento por região em 2011 (LAGARINHOS, 2011).

A reutilização dos pneus está sendo estudada pelo IBAMA, para avaliar se esta disposição se enquadra no conceito de destinação ambientalmente correta, constante na Resolução no 416/09. A queima de pneus inservíveis em caldeiras de leito fluidizado e pirólise não são consideradas na estatística do IBAMA, devido a exigência de regulamentação específica, para a utilização de pneus inservíveis como combustíveis em processos industriais conforme o parágrafo único do artigo 15 da Resolução CONAMA no 416/09.

2.8 UTILIZAÇÃO DA BORRACHA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Durante muitos anos, engenheiros e químicos trabalham misturando borracha natural (látex) e borracha sintética (polímeros) em ligantes asfálticos na tentativa de melhorar as propriedades elásticas do ligante asfáltico. Mas só na década de 40 se iniciou a história da adição de borracha reciclada de pneus em materiais para pavimentação asfáltica com a Companhia de Reciclagem de Borracha, U.S. Rubber Reclaiming Company, que introduziu no mercado um produto composto de material asfáltico e borracha desvulcanizada reciclada, denominado Ramflex™ (ODA, 2000).

Em obras de pavimentação, a borracha de pneus pode ser incorporada aos materiais asfálticos através de dois processos: úmido e seco. No processo úmido, a borracha moída (cerca de 5 a 25% do peso total de ligante) é incorporada ao ligante asfáltico antes de se adicionar o agregado (asfalto-borracha), atuando como modificadora do cimento asfáltico. No processo seco, a borracha moída (cerca de 1% a 3% do peso total da mistura) é misturada com o agregado (agregado-borracha) antes de se adicionar o ligante asfáltico, em substituição de uma pequena parte dos agregados finos. As técnicas de produção de mistura para o processo seco são semelhantes às utilizadas na produção de CAUQ (Concreto Asfáltico Usinado a Quente) convencional (ODA, 2000).

O ligante asfalto-borracha tem sido aplicado em vários serviços de pavimentação, como selagem de trincas, tratamento superficiais, camadas intermediárias entre o pavimento existente e a camada de reforço e em concreto asfáltico usinado a quente. Apesar da ocorrência de defeitos na superfície de rolamento, de uma maneira geral os resultados têm sido positivos. Os principais defeitos relatados são exsudação e as trincas por contração de origem térmica, associados à dosagem inadequada do teor de asfalto-borracha. Quando comparado com o ligante convencional, pode-se verificar que a quantidade de asfalto-borracha necessária para uma determinada mistura é maior, o que justifica a exsudação, mas ao mesmo tempo proporciona uma maior durabilidade à mistura asfáltica (ODA, 2000).

Verifica-se que o selante com asfalto-borracha dura cerca de 3 vezes mais que o sem asfalto borracha. Serviços executados com asfalto-borracha apresentam

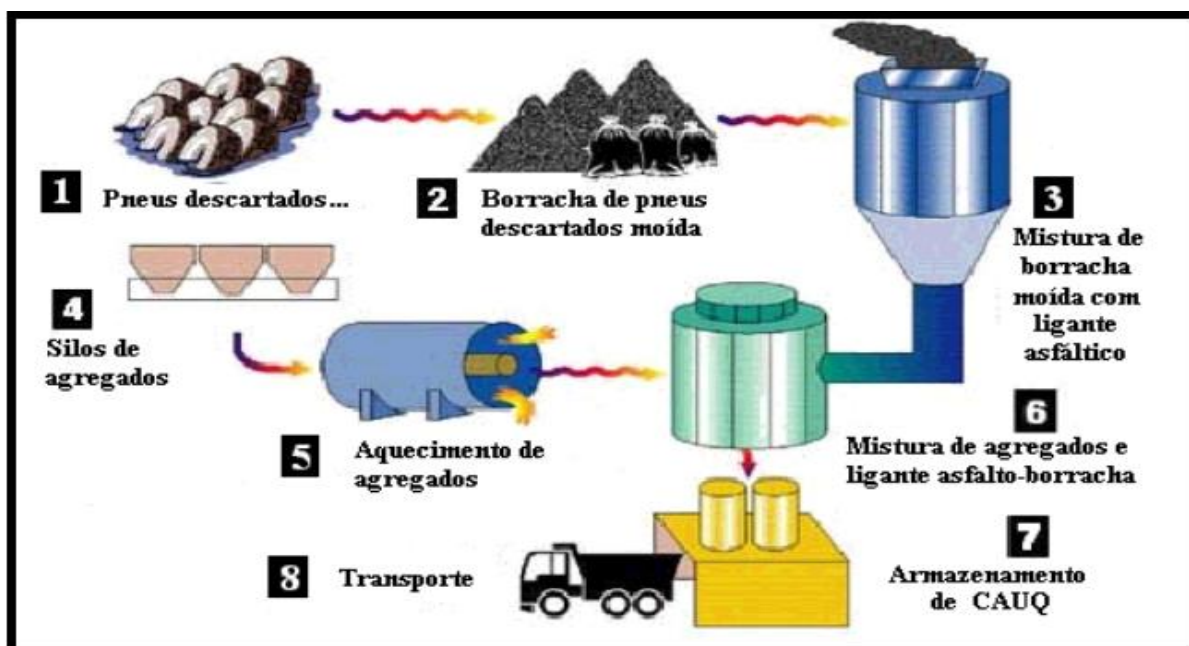
um custo aproximado de 50% maior do que os serviços executados com ligantes sem borracha. Apesar dessa diferença no custo, quando analisados em conjunto, o custo e vida útil, pode-se verificar que serviços com asfalto-borracha são mais vantajosos. 17 A escolha do tipo de selante varia de acordo com as características da região em que será feita a aplicação (volume de tráfego, clima etc.). Nos Estados Unidos, cerca de 80% dos estados, em todas as regiões, utilizam esse tipo de selante, com destaque para Arizona, Califórnia, Georgia, Nebraska, New York, Pennsylvania, Texas e Wisconsin (HEIZTMAN, 1992).

Quando se adiciona borracha em uma mistura asfáltica pelo processo seco, as partículas mais finas da borracha reagem com o ligante enquanto que as partículas maiores atuam como “agregado elástico” no concreto asfáltico. A combinação de ligante modificado e aumento da elasticidade das misturas asfálticas tende a produzir pavimentos mais resistentes à fadiga e ao trincamento a baixas temperaturas. Existem evidências, também, de que a adição de borracha triturada, dentro de certos limites, aumenta a resistência à deformação permanente em relação às misturas convencionais (BERTOLLO e FERNANDES JR., 2002).

Cada tonelada de mistura asfáltica pode incorporar a borracha de 1 a 4 pneus de veículo de passeio (BERTOLLO e FERNANDES JR., 2002) e cerca de 700 pneus por quilômetro pavimentado segundo o Grupo Greca Distribuidora de Asfalto (ABTI, 2001).

Veja na FIGURA 2.4, a planta de produção do concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) modificado por borracha reciclada e na FIGURA 2.5, a execução de uma pavimentação asfáltica utilizando o asfalto-borracha.

Figura 7- Planta de produção do concreto asfáltico usinado a quente modificado por borracha (asfalto-borracha)



Fonte: RACTC – Rubberized Asphalt Concrete Technology Center, 2001

Figura 8 – Pavimentação de rodovias



Fonte: www.rubberpavement.org/newsletter/summer2000/page4.html

No Brasil, na década de 90, o CENPES (Centro de Pesquisas da Petrobrás) começou a desenvolver pesquisas voltadas à área de materiais asfálticos modificados por polímeros, com o objetivo principal de estudar o desempenho desses materiais. Foram realizados, também, alguns experimentos com materiais

asfálticos modificados por borracha de pneus moída, sendo desenvolvida uma pesquisa, com a UFSC, que tinha como objetivo comparar tipos de borracha de diferentes fornecedores e processos de produção. Outros estudos, utilizando borracha de pneus moída, estão sendo desenvolvidos em universidades e centros de pesquisas (como por exemplo, na UFRJ, UFRGS, UFSC, UEM e USP) (ODA, 2000).

Apesar de algumas evidências de que misturas betuminosas executadas com adição de borracha picada têm suas propriedades melhoradas, não existem resultados conclusivos sobre o desempenho dos pavimentos a longo prazo. Muito precisa ainda ser pesquisado, não só mediante ensaios tradicionalmente utilizados, mas também com ensaios e conceitos considerados durante as pesquisas de materiais betuminosos do Programa SHRP (Strategic Highway Research Program) (BAHIA et al., 1998).

A adição de borracha de pneus em ligantes asfálticos utilizados em obras de pavimentação representa uma alternativa para a redução do grave problema ambiental causado pela disposição inadequada de pneus usados. Ainda existem obstáculos ao emprego dessa tecnologia, principalmente de origem econômica, pois a trituração dos pneus representa um custo relativamente alto. Mas a medida em que trabalhos de pesquisa apresentarem resultados sobre a viabilidade técnica e a sociedade se conscientizar do elevado custo ambiental da disposição de pneus inservíveis, certamente o uso do ligante asfalto-borracha se disseminará (ODA, 2000).

3. METODOLOGIA

3.1 DESENHO DE ESTUDO

O presente estudo será classificado como uma pesquisa do tipo descritiva no qual, os procedimentos metodológicos adotados serão de pesquisas bibliográficas. Essa pesquisa será elaborada através de documentos de livros, artigos, normas técnicas, dissertações de mestrado e teses de doutorado de autores que tenham relação com o tema que irá ser abordado.

3.2 LOCAL DE PERIODO DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa será realizada em Palmas, no estado do Tocantins, mas como será uma pesquisa de campo descritiva e de natureza básica, todos os dados que serão colocados serão de cunho bibliográfico, utilizando apenas uma ferramenta computacional para sua elaboração. Sua realização e composição dos resultados serão entre os meses de julho a setembro de 2020, na qual, será apresentada na segunda parte da elaboração dessa pesquisa.

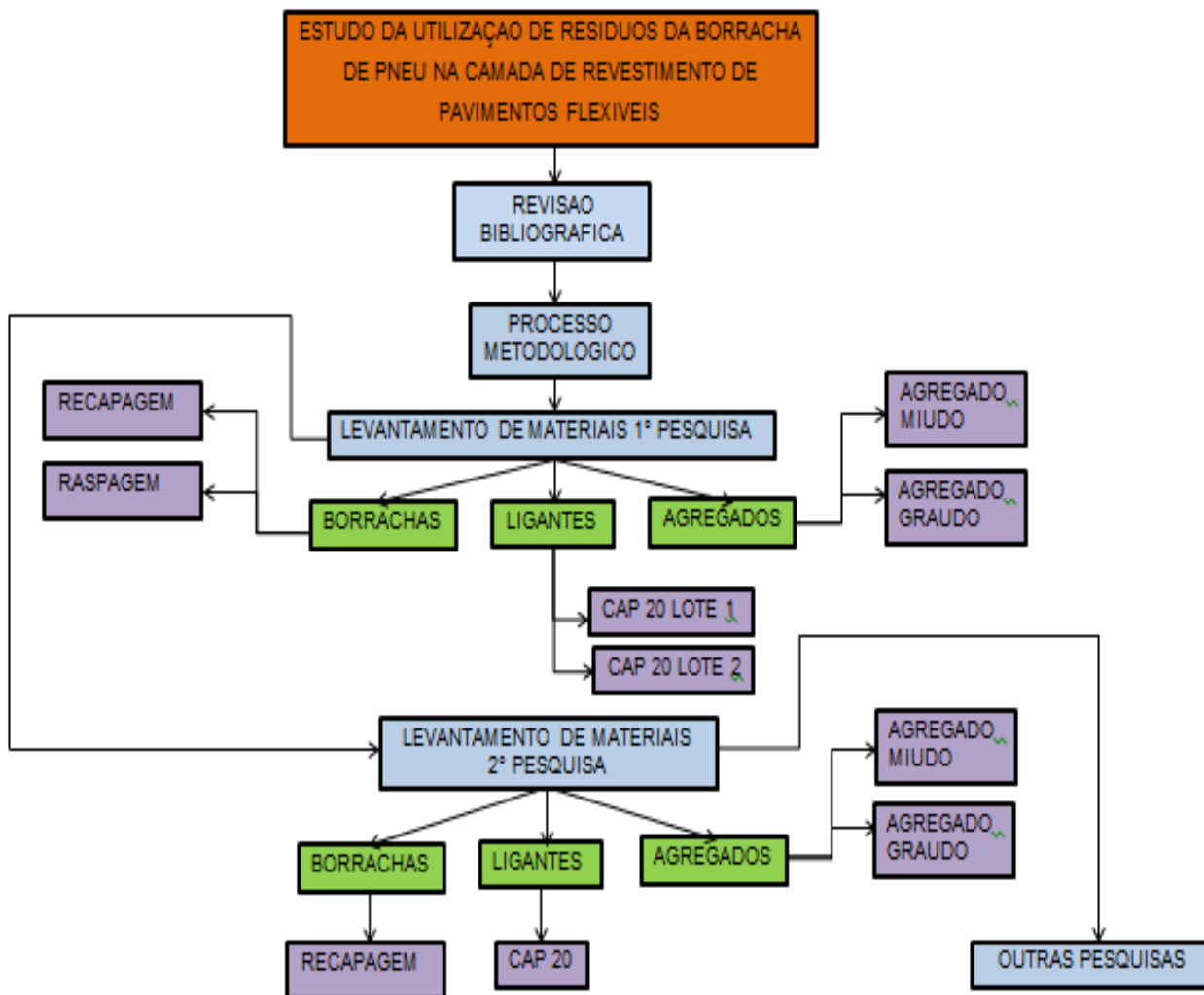
3.3 OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo dessa pesquisa será o levantamento de dados referente aos resíduos de borracha de pneus na composição da camada de revestimento de um pavimento flexível. As pesquisas que serão utilizadas na composição desse trabalho estão delimitadas entre os anos de 2000 a 2020. Os dados que serão extraídos das pesquisas serão organizados, trabalhados e comentados de forma a apresentar se os resultados das pesquisas são satisfatórios ou não em relação os modelos convencionais.

3.4 INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS E ANÁLISE

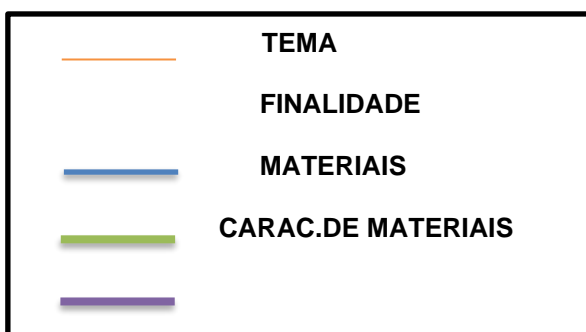
3.4.1 Levantamento de dados

Figura 9 - Fluxograma



Fonte: Próprio Autor, 2020

LEGENDA DO FLUXOGRAMA:



3.4.1.1 Levantamento de materiais 1ª pesquisa

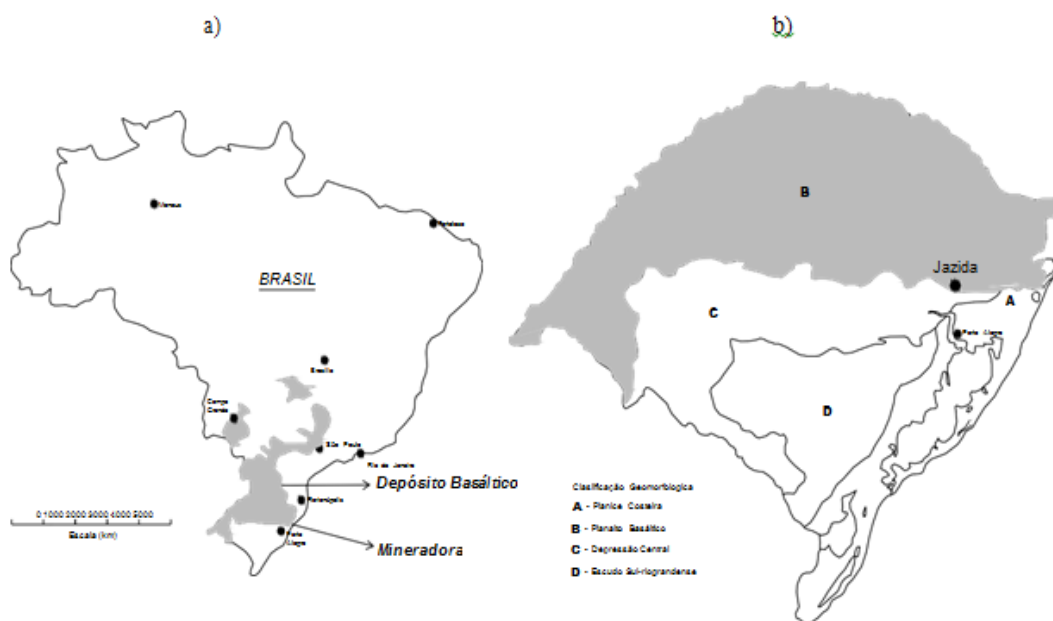
3.4.1.1.1 Ligantes

Para a caracterização dos ligantes de referencia foi selecionado o cimento asfáltico CAP 20 comercializado no estado e proveniente da Refinaria Alberto Pascoalini em Canoas/RS. A empresa Ipiranga Asfaltos S.A. foi à responsável por fornecer o ligante, no qual, foi fornecido em dois lotes (lote 1 e lote 2). O CAP 20 lote 1 foi utilizado para a preparação das misturas borracha-agregado e o lote 2 para as misturas AB.

3.4.1.1.2 Agregados

Para a caracterização dos agregados de referencia foi selecionado o material pétreo, rocha basáltica básica da formação Serra Geral, semelhante à encontrada em outros pontos do estado e considerada a mais representativa desta região do país. A localização da jazida e a representatividade do derrame basáltico no Brasil e no estado do Rio Grande do Sul podem ser observados na Figura 9. A empresa responsável pelo fornecimento foi a Brita Mineração. O derrame basáltico cobre, aproximadamente, 54% do território gaúcho. Foi utilizado também areia de várzea de grãos duros e arredondados encontrados na mesma região do estado e fornecido pela mesma empresa.

Figura 10– Localização da jazida e do derrame basáltico



a) no Brasil

b) no estado do Rio Grande do Sul

Segundo ABGE (1998) os basaltos são as rochas ígneas vulcânicas mais abundantes e sua maior ocorrência é na forma de derrames, no Brasil, constituem a Formação Serra Geral da Bacia do Paraná, onde perfazem mais de 90% dos rochas vulcânicas aí existentes. A mineralogia essencial é plagioclásio cálcico (labradorita) (35-50%), augita (20-40%), magnetita ou ilemita (5-15%) e quantidades muito variáveis de matriz vítrea. A textura é afanítica, microgranular, por vezes amigdaloidal.

3.4.1.1.3 Borrachas

Para a caracterização das borrachas de referencia, foram selecionadas duas fontes de borracha: borracha proveniente da produção de bandas para recapagem e borracha proveniente da raspagem de pneumáticos na preparação para o processo de recauchutagem (Raspa). A empresa responsável pelo fornecimento da borracha foi a empresa Vipal Borrachas S.A. de Nova Prata.

3.4.1.2 Levantamento de materiais 2ª pesquisa

3.4.1.2.1 Ligantes

Para a caracterização dos ligantes de referencia, foi empregado cimento asfáltico de petróleo do tipo CAP 20 (classificação por viscosidade) pertencente a um único lote proveniente da Refinaria de Araucária (Paraná). A densidade do cimento asfáltico foi determinada, com base no método DNER-ME 16/64.

3.4.1.2.2 Agregados

Para a caracterização dos ligantes de referencia, o agregado mineral empregado é oriundo da empresa Pedrita (pedreira do Rio Tavares), da cidade de Florianópolis (Santa Catarina) e constitui-se de granito britado em três faixas granulométricas básicas: brita 19 mm (19,1 - 9,5 mm; 17%), pedrisco (9,5 - 4,8 mm; 18%) e pó-de-pedra (4,8 - 0,0 mm; 65%).

3.4.1.2.3 Borrachas

A borracha empregada foi obtida por trituração do material resultante da recapagem de pneus de veículos comerciais leves. Não é informado o local e a empresa responsável pelo fornecimento.

3.4.1.3 Levantamento de materiais e métodos 3ª pesquisa

Para caracterizar as misturas asfálticas foram preparadas amostras com duas granulometrias de borracha, uma grossa (G) e outra fina (F), substituindo parte dos agregados pétreos em algumas frações da curva granulométrica. Foram utilizadas quantidades de borracha equivalentes a 1 e 2% do peso total da mistura. Essas misturas foram comparadas a uma mistura convencional, sem borracha (mistura de controle).

A borracha triturada foi fornecida pela BORCOL Indústria de Borracha Ltda, localizada no município de Sorocaba - SP. Foram utilizadas duas granulometrias: uma denominada "G" (grossa), contendo partículas com diâmetros variando de 9,5 mm (3/8") até 0,60 mm (#30) e outra, denominada "F" (fina), contendo partículas com diâmetros variando de 1,18 mm (#16) até 0,15 mm (#100). Foram utilizados agregados britados, de natureza basáltica, provenientes da Pedreira INDERP localizada no município de Ribeirão Preto - SP. O ligante asfáltico utilizado na moldagem dos corpos-de-prova foi o CAP-20.

A dosagem das misturas asfálticas foi feita pelo método Marshall de acordo com os padrões estabelecidos pela NBR 12891/93 da ABNT (1993). Trabalhou-se com uma granulometria correspondente ao centro da faixa "C" do DNER. Para seleção do teor ótimo de asfalto considerou-se um volume de vazios de 4% para a mistura de controle. As misturas contendo borracha foram moldadas utilizando a mesma quantidade de ligante da mistura de controle.

3.4.1.4 Levantamento de materiais e métodos 4ª pesquisa

O estudo de caso consiste na avaliação e comparação das propriedades volumétricas e de resistência de três misturas asfálticas destinadas para camada de revestimento de pavimentos. Sendo as misturas um concreto asfáltico do tipo a quente convencional, enquadrado na faixa C do DNIT e outras duas do tipo asfalto borracha pelo processo seco, com a diferença entre essas, a granulometria da borracha utilizada. A borracha utilizada no trabalho é resultado do processo de recapagem de pneu, onde se

CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA – CRICTE 2017 15 a 18 de novembro de 2017 – Ijuí – RS – Brasil obtêm a fibra de pneu. A diferença entre a mistura asfáltica convencional utilizada e o asfalto borracha, é a substituição de 0,7% de pó de pedra por borracha na mistura.

Para caracterização dos materiais foi realizada a análise granulométrica, utilizando o método das peneiras, conforme recomendações da norma DNER-ME 083/98. Também foi realizada a densidade dos agregados e da borracha. Os ensaios mecânicos realizados num primeiro momento foram de fluência e estabilidade, onde foram moldados 3 corpos de provas de cada mistura asfáltica estudada para fazer sua análise.

3.4.1.5 Levantamento de materiais e métodos 5ª pesquisa

Os agregados pétreos, graníticos britados, utilizados neste trabalho foram provenientes de uma pedreira localizada no norte de Portugal. Um filer calcário calcítico foi adicionado à mistura para satisfazer às exigências granulométricas. Os agregados minerais utilizados na produção das misturas asfálticas possuem a seguinte designação granulométrica: (i) brita 6/12 – tamanho nominal 6,0 a 12,0 mm; (ii) brita 4/10 – tamanho nominal 4,0 a 10,0 mm; (iii) brita 0/4 (pó de pedra) – tamanho nominal inferior a 4,0 mm. A Figura 1 apresenta a análise granulométrica dos agregados. Os resultados ensaios físicos e mecânicos dos agregados mostraram que os mesmos satisfazem às especificações, sendo adequados para a produção de misturas asfálticas.

O asfalto convencional utilizado como asfalto base na produção dos asfaltos-borracha e também na confecção da mistura convencional foi o CAP 50/70, de origem brasileira. O CAP 50/70 é especificado de acordo com a norma DNIT – EM 095 (2006). O Quadro 1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização do CAP 50/70 (AC).

O asfalto-borracha utilizado é proveniente do sistema *terminal blend*, de procedência brasileira. A borracha foi produzida no processo ambiente, no qual o corte e moagem dos pneus usados são realizados em temperatura ambiente. Foram utilizados dois tipos de asfalto-borracha *terminal blend*, com porcentagens de borracha incorporada de 15% (AB15) e de 20% (AB20).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANALISE DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM INCORPORAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS

4.1.1 Ensaio utilizados

- Estabilidade e Fluência
- Deformabilidade elástica e resistência à tração
- Resistência à fadiga

A Tabela 2 apresenta os valores de estabilidade e fluência para as misturas preparadas com ligante asfáltico convencional e ligante modificado com borracha de pneus.

Tabela 2: Valores de estabilidade e fluência da mistura com ligante convencional e com ligantes modificados com borracha

<i>Variável</i>	<i>Especificação¹</i>	<i>Ligante Utilizado</i>			
		<i>CAP 20</i>	<i>AB 14</i>	<i>AB 41</i>	<i>AB 68</i>
<i>Teor de Borracha no Ligante (%)²</i>	--	0,00	6,00	12,00	18,00
<i>Estabilidade (kN)</i>	<i>> 8,0</i>	12,5	14,3	10,5	10,4
<i>Fluência (mm)</i>	<i>2,0 a 4,6</i>	2,28	2,54	2,79	2,54
<i>Relação Est/Fluência (MN/m)</i>	--	5,48	5,62	3,76	4,09

Fonte: Specht, 2004

Tabela 3: Classificação quanto a satisfação dos resultados de acordo com os limites máximos adotados

	Fluência	Estabilidade	Satisfatório:	
CAP 20			Sim	
AB 14			Não	
AB 41				
AB 68				

Fonte: Próprio Autor, 2020

Os valores de estabilidade apresentam uma leve redução com o aumento de teor de borracha enquanto que os valores de fluência aumentaram de maneira pouco significativa, entretanto todas as misturas

estão em acordo com as especificações.

A tabela 4 apresenta os valores de módulo de resiliência e resistência à tração à 25°C das amostras preparadas com ligantes modificados com diferentes teores de borracha, em comparação com as propriedades da mistura preparada com ligante convencional CAP 20.

Tabela 4: Valores de módulo de resiliência e resistência à tração da mistura com ligante convencional e com ligantes modificados com borracha (T = 25°C)

<i>Variável</i>	<i>Ligante Utilizado</i>			
	<i>CAP 20</i>	<i>AB 14</i>	<i>AB 41</i>	<i>AB 68</i>
<i>Teor de Borracha no Ligante (%)¹</i>	0,0	6,0	12,0	18,0
<i>Módulo de Resiliência (MPa)</i>	6510	5220 (80 ²)	4480 (69 ²)	4810 (74 ²)
<i>Resistência à Tração (MPa)</i>	1,27	1,44 (113 ²)	1,42 (112 ²)	1,39(109 ²)
<i>Relação Mr/Rt</i>	5126	3625	3155	3460
<i>Relação Rt/Mr x10⁻³</i>	0,20	0,28	0,32	0,29

Fonte: Specht, 2004

Tabela 5: Classificação quanto a satisfação dos resultados em relação a mistura convencional

	Módulo de resiliência (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Satisfatório:	
CAP 20			Sim	
AB 14			Não	
AB 41				
AB 68				

Fonte: Próprio Autor, 2020

Os valores de módulo de resiliência apresentaram redução significativa com a inclusão de borracha no ligante. Esta redução é mais pronunciada para os teores maiores de borracha; nota-se também que para o ligante AB 41 a redução de módulo foi maior que para o ligante AB 68. Isto está relacionado ao espaço intergranular decorrente da presença do ligante e a maior rigidez do ligante.

A análise dos valores de módulo de resiliência é bastante complexa, visto que, dependendo da estrutura de pavimento que este material estará inserido, valores maiores ou menores serão tolerados. É necessária sim, uma compatibilização de rigidez entre as camadas que constituem o sistema.

Tabela 6: Constantes dos modelos de fadiga

Mistura	Tensão de Tração (MPa)			Dif. de Tensões (MPa)			Defor. Tração (cm/cm)		
	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
Referência	28,22	-2,93	0,98	1640	-2,93	0,98	5,55.10 ⁻⁶	-2,03	0,97
AB 14	52,91	-3,04	0,99	3565	-3,04	0,99	4,15.10 ⁻⁵	-1,82	0,97
AB 41	87,78	-2,82	0,99	4378	-2,82	0,99	7,32.10 ⁻⁶	-2,00	0,94
AB 68	94,00	-2,81	0,94	4610	-2,81	0,94	2,79.10 ⁻⁶	-2,10	0,99

Fonte: Specht, 2004

Tabela 7: Classificação quanto a satisfação dos resultados em relação a mistura referência

	Tensão de Tração (MPa)	Dif. de Tensões (MPa)	Defor. Tração (cm/cm)	Satisfatório:	
Referência				Sim	
AB 14				Não	
AB 41					
AB 68					

Fonte: Próprio Autor, 2020

Na tabela 6 é possível afirmar, que para o mesmo estado de tensões, qualquer uma das misturas com borracha testadas possui um desempenho superior ao da mistura de referência.

4.2 ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS EM MISTURAS ASFÁLTICAS

4.2.1 Ensaios utilizados

- Resistência à tração por compressão diametral
- Módulo de resiliência
- Vida de fadiga

As Tabelas 8, 9 e 10 apresentam os dados verificados no ensaio de resistência à tração por compressão diametral executados conforme a norma DNER-ME 138/86.

Tabela 8: Resumo do ensaio de resistência à tração do Traço 0,7

TRAÇO 0,7		
Mistura	Teor CAP (%)	Resistência à tração (kgf/cm ²)
1	3,97	5,88
2	4,47	6,47
3	4,97	6,70
4	5,46	6,94
5	5,96	6,17

Fonte: SALINI, 2000

Tabela 9: Resumo do ensaio de resistência à tração do Traço 1,1

TRAÇO 1,1		
Mistura	Teor CAP (%)	Resistência à Tração (kgf/cm ²)
1	4,65	5,50
2	5,25	5,97
3	5,84	6,38

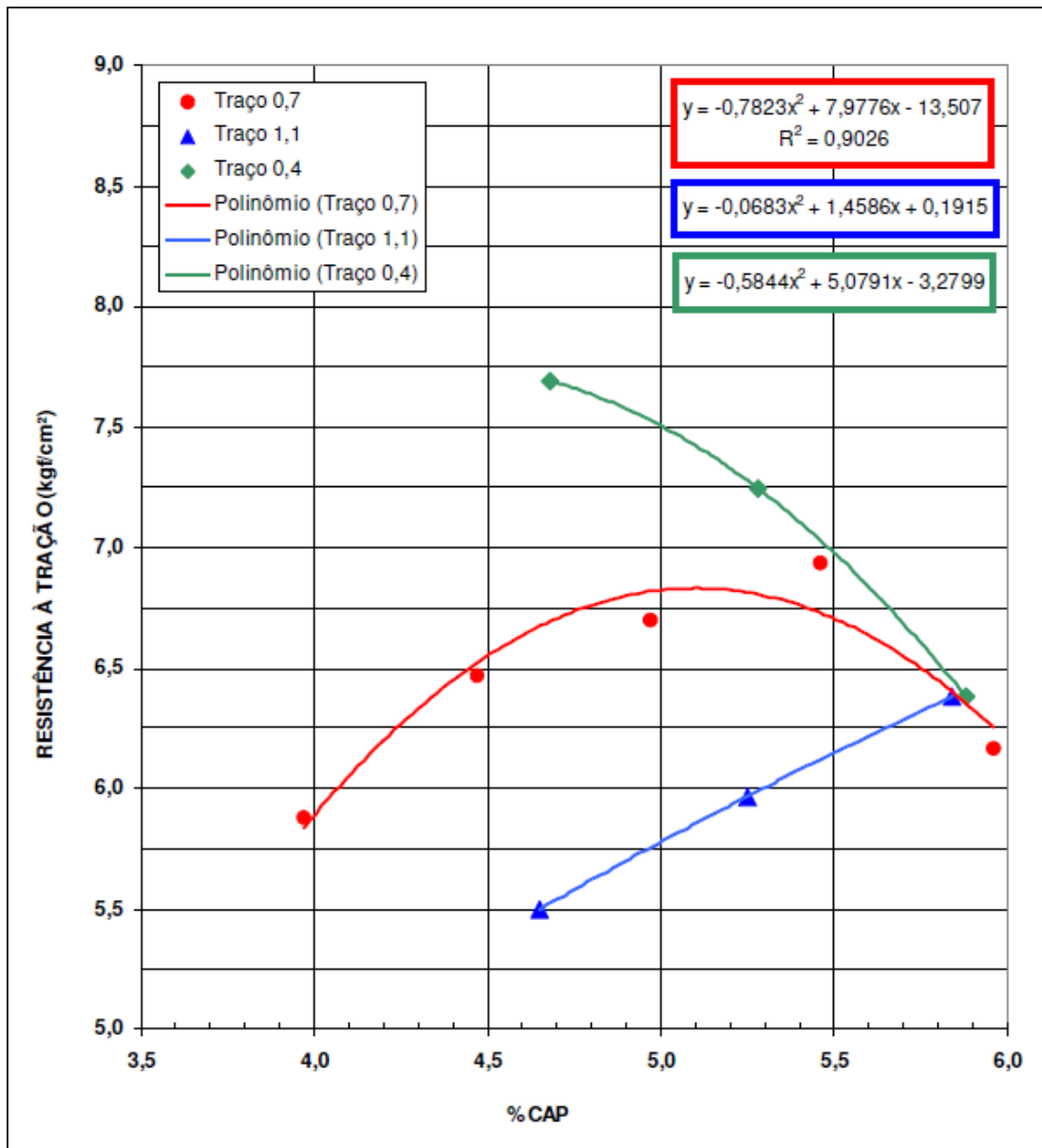
Fonte: SALINI, 2000

Tabela 10: Resumo do ensaio de resistência à tração do Traço 0,4

TRAÇO 0,4		
Mistura	Teor CAP (%)	Resistência à Tração (kgf/cm ²)
1	4,68	7,69
2	5,28	7,25
3	5,88	6,38

Fonte: SALINI, 2000

Figura 11: Gráfico comparativo dos valores das resistências à tração



Fonte: SALINI, 2020

Observa-se uma queda da resistência à tração (Figura 11) com o aumento da quantidade de borracha na mistura, comportamento que, em primeira análise, é o oposto daquele esperado, ou seja, com o incremento da quantidade de borracha havia a expectativa de que a resistência à tração aumentasse. O comportamento verificado, entretanto, pode ser explicado pela redução da viscosidade da mistura devido ao aumento da quantidade de borracha, uma vez que a velocidade de aplicação da carga é a mesma para todos os corpos de prova.

Tabela 11: Resumo dos resultados obtidos no ensaio de resiliência da mistura de referência

Número do corpo de prova	Altura do C.P. (cm)	Pressão Manom. (kgf/cm ²)	OSCILÓGRAFO		Carga (kgf)	Deformação Resiliente (cm)	Módulo Resiliente (MPa)	Módulo Resiliente Médio (MPa)
			Registro (div)	Sens. (mV/div)				
2814	6,47	3,0	3,0	1	533,1	0,001067	4306	4314
		3,5	3,5	1	624,4	0,001244	4322	
2819	6,47	2,5	3,0	1	441,9	0,001067	3569	3630
		3,0	3,5	1	533,1	0,001244	3691	
2827	6,40	3,5	2,5	1	624,4	0,000889	6117	5563
		4,0	3,5	1	715,6	0,001244	5008	
Módulo de resiliência médio final ⇒								4502

Fonte: SALINI, 2000

Tabela 12: Resumo dos resultados obtidos no ensaio de resiliência da mistura experimental otimizada

Número do corpo de prova	Altura do C.P. (cm)	Pressão Manom. (kgf/cm ²)	OSCILÓGRAFO		Carga (kgf)	Deformação Resiliente (cm)	Módulo Resiliente (MPa)	Módulo Resiliente Médio (MPa)
			Registro (div)	Sens. (mV/div)				
2953	6,59	2,5	2,7	1	441,9	0,000960	3893	3345
		3,0	4,0	1	533,1	0,001422	3170	
		3,5	5,0	1	624,4	0,001778	2970	
2967	6,49	2,5	3,3	1	441,9	0,001173	3234	3100
		3,0	4,0	1	533,1	0,001422	3219	
		3,5	5,3	1	624,4	0,001884	2845	
2962	6,56	2,5	5,3	1	441,9	0,001884	1992*	2630
		3,0	4,0	1	533,1	0,001422	3185	
		3,5	5,5	1	624,4	0,001955	2713	
Módulo de resiliência médio final ⇒								3025

Fonte: SALINI, 2000

A mistura de referência apresentou módulo resiliente médio de 4502 MPa, o que constitui um valor elevado se comparado com módulos tipicamente encontrados em concretos asfálticos nacionais. O valor modular da mistura experimental otimizada apresentou significativa queda em relação ao da mistura de referência, fenômeno lógico, pois há a incorporação da borracha (material de baixa

rigidez), e tendência também encontrada em misturas asfálticas que empregam polímeros virgens e avaliadas à 25° C (REIS). Entretanto, apesar desta queda, o valor modular de 3153 MPa pode ser considerado muito bom e apresenta-se dentro da média recomendada pelo DNER para obras federais que não empregam borracha (2500 à 3500 MPa).

Tabela 13: Resumo dos resultados obtidos no ensaio de vida de fadiga da mistura de referência

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm ²)	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
2.811	6,40	10,20	10	105,6	0,61	0,0000224	0,40	98.939
2.812	6,44	10,20	15	159,4	0,98	0,0000336	0,61	14.179
2.813	6,50	10,19	20	214,3	1,26	0,0000449	0,81	1.836
2.815	6,42	10,20	20	211,9	1,25	0,0000449	0,81	2.551
2.816	6,44	10,19	30	318,5	1,83	0,0000673	1,21	2.273
2.817	6,46	10,20	30	319,8	1,84	0,0000673	1,21	1.071
2.818	6,48	10,19	40	427,3	2,43	0,0000897	1,62	352
2.820	6,51	10,19	40	429,3	2,44	0,0000897	1,62	407
2.821	6,43	10,18	15	158,9	0,98	0,0000336	0,61	9.743
2.822	6,44	10,20	20	212,6	1,25	0,0000449	0,81	11.794
2.823	6,22	10,18	20	204,9	1,21	0,0000449	0,81	3.303
2.824	6,48	10,17	20	213,2	1,25	0,0000449	0,81	3.879

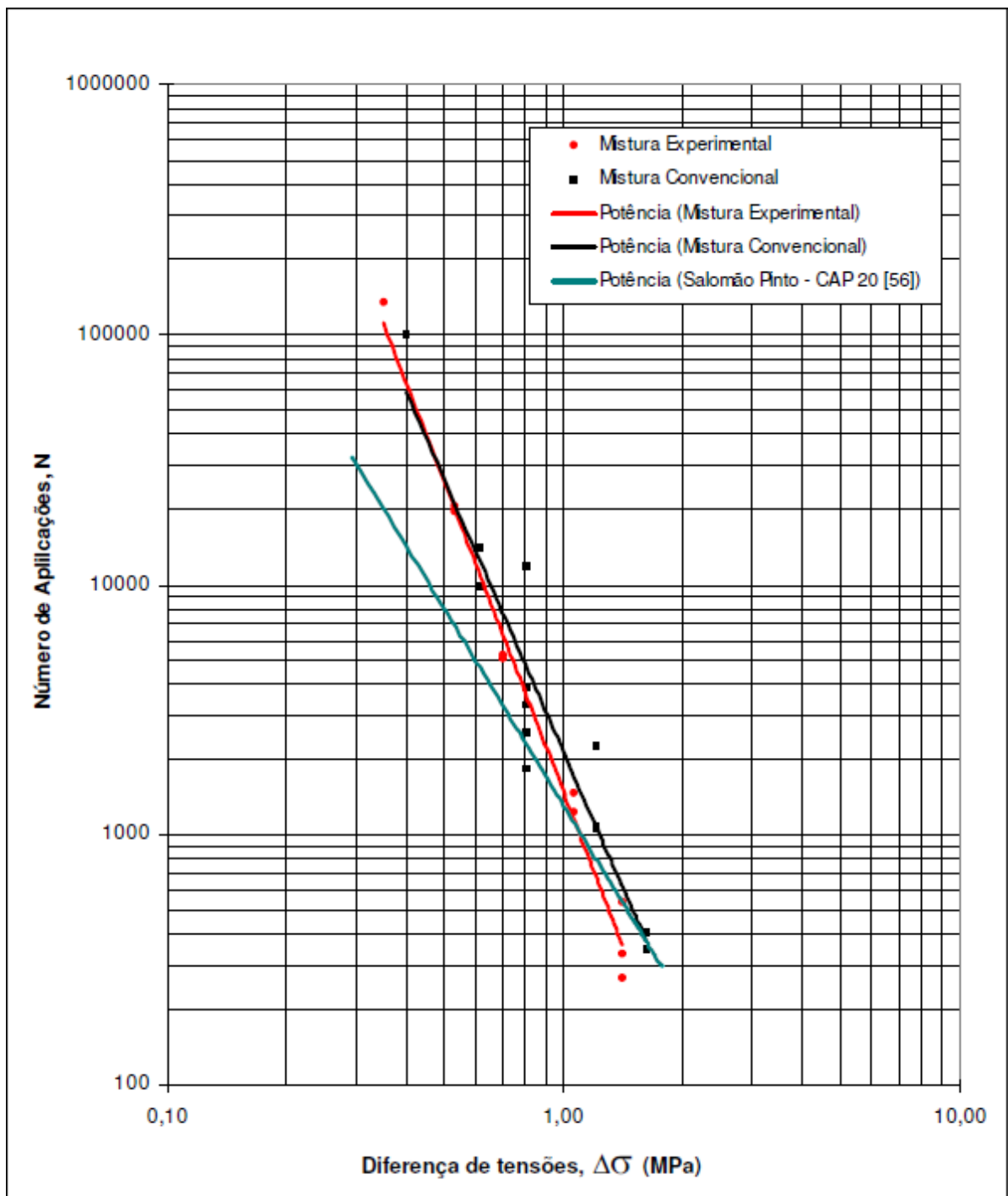
Fonte: SALINI, 2000

Tabela 14: Resumo dos resultados obtidos no ensaio de vida de fadiga da mistura experimental otimizada

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm ²)	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
2.950	6,56	10,20	10	94,3	0,53	0,0000291	0,35	135.770
2.951	6,55	10,18	10	94,0	0,53	0,0000291	0,35	*
2.955	6,53	10,21	20	188,0	1,11	0,0000582	0,70	5.052
2.954	6,60	10,18	20	189,5	1,12	0,0000582	0,70	5.210
2.956	6,68	10,19	30	287,9	1,66	0,0000873	1,06	1.229
2.757	6,61	10,18	30	284,6	1,65	0,0000873	1,06	1.465
2.959	6,63	10,20	40	381,4	2,18	0,0001164	1,41	537
2.960	6,64	10,18	40	381,2	2,18	0,0001164	1,41	268
2.961	6,66	10,17	40	382,0	2,18	0,0001164	1,41	336
2.963	6,61	10,17	50	473,9	2,69	0,0001455	1,76	*
2.965	6,55	10,21	15	141,4	0,86	0,0000436	0,53	20.534
2.966	6,57	10,19	15	141,6	0,86	0,0000436	0,53	19.655

Fonte: SALINI, 2000

Figura 12: Gráfico comparativo das tabelas de vida de fadiga (13 e 14) em termos de diferença de tensões



Fonte: SALINI, 2000

A vida de fadiga registrada em termos de diferença de tensões apresentou comportamento bastante similar entre a mistura de referência e a mistura experimental otimizada. Esta coincidência de curvas permite afirmar, sem a necessidade da realização de nenhum cálculo, que a mistura experimental otimizada, por possuir módulo de resiliência inferior, apresentará uma durabilidade superior à mistura de referência. Cabe lembrar que módulo inferior significa deformações maiores e tensões internas menores.

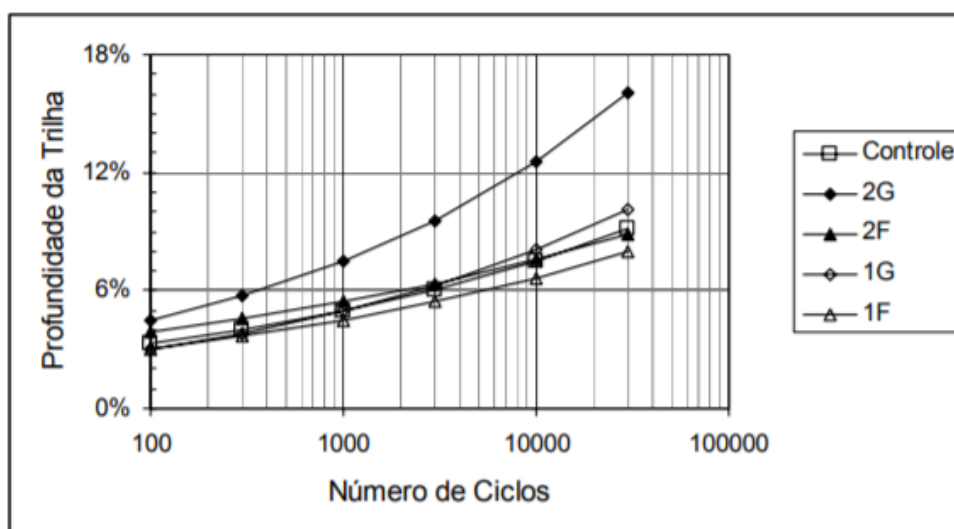
4.3 ANALISE DA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA DE PNEUS EM PAVIMENTOS

4.3.1 Ensaio utilizados

- Ensaio de trilha de roda;
- Ensaio mecânicos.

A Figura 13 ilustra a variação da porcentagem de afundamento em trilha de roda com o número de ciclos para a mistura de controle e as misturas preparadas com 1 e 2% de borracha nas granulometrias G e F. A Tabela 15 apresenta o resumo dos resultados (média de 3 corpos-de-prova) obtidos para MR e RT, a relação MR/RT e os resultados do ensaio de trilha de roda (média entre duas placas ensaiadas). O coeficiente angular é obtido através da equação de regressão de cada mistura e representam a taxa de deformação com o número de ciclos. Neste trabalho, considerou-se o limite máximo de afundamento na trilha de roda, após 30.000 ciclos, de 10%.

Figura 13: Resultados dos ensaios de trilha de roda



Fonte: Bertollo *et al.*, 2002

Tabela 15: Resultados Obtidos nos Ensaio Mecânicos

PARÂMETRO	MISTURAS				
	2G	2F	1G	1F	CONTROLE
MR (MPa, 25°C)	1634	2104	2165	2793	3637
RT (MPa, 25°C)	1,02	0,99	1,14	1,11	1,29
MR/RT	1602	2125	1899	2516	2819
AFUNDAMENTO (30.000 Ciclos)	16%	9%	10%	8%	9%
COEFICIENTE ANGULAR	0,2234	0,1499	0,2129	0,1681	0,1789

Fonte: Bertollo *et al.*, 2002

Tabela 16: Classificação quanto a satisfação dos resultados de acordo com os limites máximos adotados

	Módulo de resiliência (MR)	Resistência à tração	Afundamento (30.000 ciclos)	Satisfatório:	
Controle				Sim	
2G				Não	
2F					
1G					
1F					

Fonte: Próprio Autor, 2020

Pelos resultados apresentados na Figura 11 e Tabela 2, quanto à resistência ao acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda, as misturas que apresentaram melhores desempenhos foram as com granulometria fina (1F e 2F), seguidas pela mistura de controle.

As misturas 1F e 2F apresentaram menores taxas de deformação (curvas menos inclinadas) quando comparadas à mistura de controle, ou seja, essas

misturas apresentam menor potencial de desenvolver deformação permanente nas trilhas de roda. As misturas modificadas com borracha apresentaram menores valores de módulo de resiliência e resistência à tração quando comparadas à mistura de controle. Os resultados dos ensaios mostram que o tamanho e o teor de borracha influem nas propriedades da mistura: quanto maior o teor e o tamanho de borracha, menor o módulo de resiliência; quanto maior o teor de borracha, menor a resistência à tração. O MR cai significativamente com uma pequena adição de borracha, mas não proporcional à redução de RT sugerindo, em princípio, uma maior flexibilidade e resistência à fadiga das misturas modificadas em relação à mistura de controle.

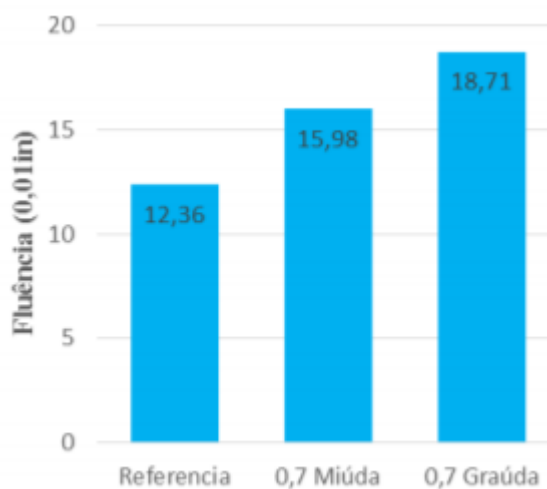
4.4 ANALISE DA MISTURA ASFÁLTICA COM INCORPORAÇÃO DA BORRACHA DE PNEU

4.4.1 Ensaios utilizados

- Ensaios de fluência;
- Ensaios de estabilidade.

O gráfico 1 a seguir apresenta os dados em 0,01in, obtidos relativos à fluência. A fluência deve estabelecer-se numa faixa de 8 a 16/0.01in, enquanto a estabilidade tem como valor mínimo 500Kgf, conforme DNER-ME/043.

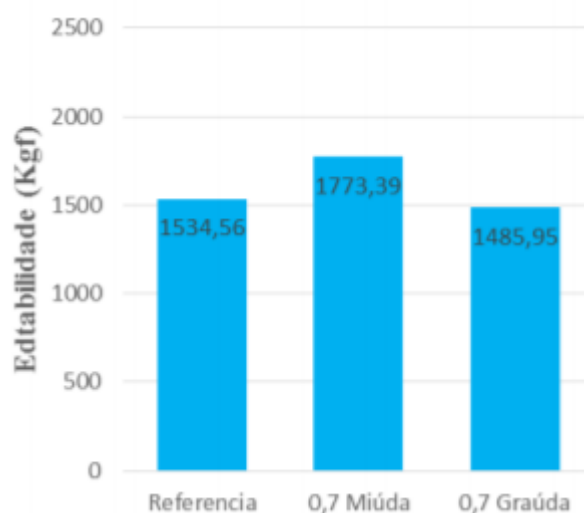
Figura 14: Gráfico de Fluência



Fonte: Echeverria et al, 2017

Em relação a fluência notou-se que houve um aumento da fluência comparado com a mistura referênciada. Percebe-se que a mistura com 0,7% de borracha graúda ficou fora do limite. Quanto a estabilidade os resultados obtidos estão representados na Figura 14.

Figura 15: Gráfico de Estabilidade



Fonte: Echeverria et al, 2017

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que a mistura miúda aumentou o valor da estabilidade e a graúda diminuiu em relação a mistura convencional.

A Tabela 17 a seguir apresenta os dados quanto a satisfação das misturas, obtidos relativos aos gráficos de Fluência e Estabilidade.

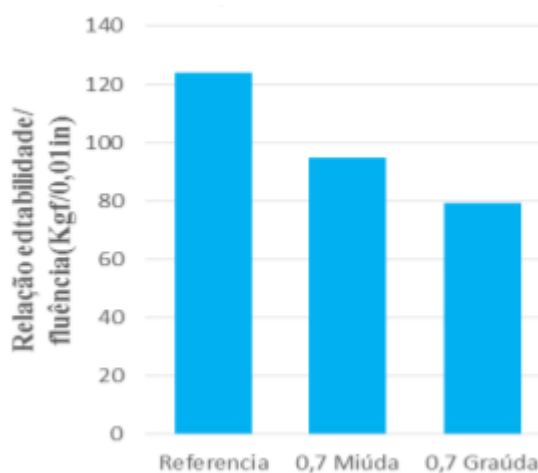
Tabela 17: Classificação quanto a satisfação dos resultados de acordo com os limites máximos adotados

	Fluência	Estabilida		Satisfatorio:
Referencia			Sim	
0,7 Miúda			Não	
0,7 Graúda				

Fonte: Próprio Autor, 2020

O Gráfico abaixo mostra a relação estabilidade/fluência.

Figura 16: Gráfico de Estabilidade/ Fluência



Fonte: Echeverria *et al*, 2017

Observando-se a relação estabilidade/fluência nota-se uma diminuição na incorporação de borracha, sendo a maior diferença entre a mistura referência e a de 0,7% de borracha graúda.

4.5 ANALISE DA REDUÇÃO DA ESPESSURA DOS PAVIMENTOS UTILIZANDO MISTURAS COM ASFALTO-BORRACHA

4.5.1 Ensaio de desempenho

- Módulo dinâmico;
- Fadiga.

A determinação do módulo dinâmico foi realizada aplicando se um carregamento sinusoidal alternado, correspondente a uma extensão máxima de tração na base do corpo-de-prova de 50×10^{-6} . Os ensaios foram conduzidos na temperatura de 20 °C em sete frequência, sendo, 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2 e 0,1 Hz, de acordo com o preconizado na norma ASTM 3497 (1995).

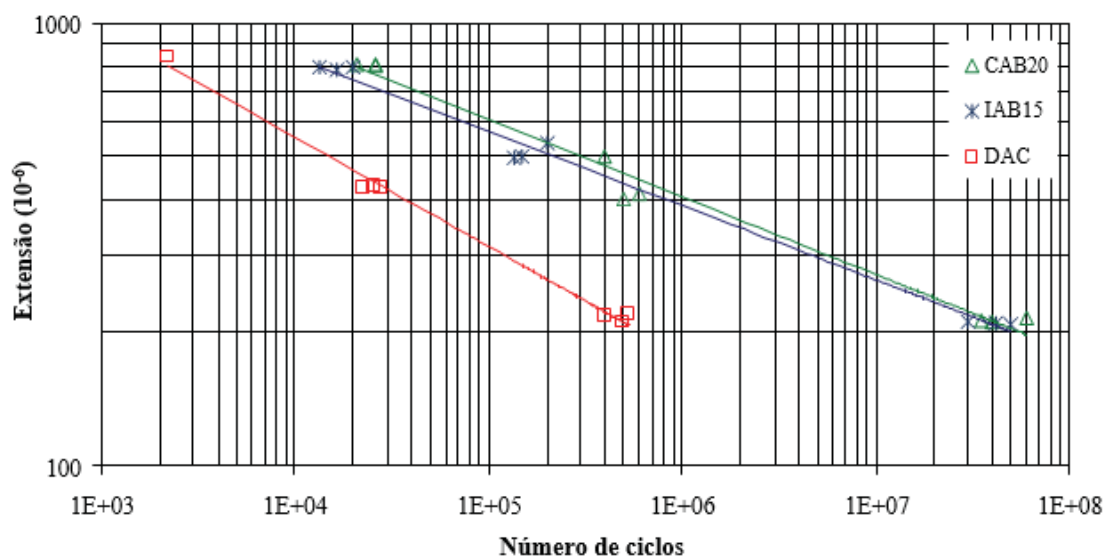
Os ensaios de fadiga foram realizados, em extensão controlada, de acordo com a norma AASHTO TP8 (1994) (*Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending*). Neste ensaio, uma carga é aplicada nos terços médios do provete, de modo a induzir uma extensão de tração predefinida. O Quadro 5 apresenta os resultados dos ensaios de módulo dinâmico das misturas e a Figura 15 as respectivas curvas de fadiga obtidas.

Tabela 18: Módulos dinâmicos

Mistura	Granulometria	Tipo de asfalto	Porcentagem de asfalto (%)	Módulo dinâmico (MPa)
CAB20	Caltrans	AB20	8,5	4864
IAB15	<i>Asphalt Institute</i>	AB15	7,0	4909
DAC	DNIT	AC	5,5	6314

Fonte: Fontes *et al.*, 2009

Figura 17: Curvas de fadiga



Fonte: Fontes *et al.*, 2009

Tabela 19: Classificação quanto a satisfação dos resultados em relação a mistura convencional

	Módulo dinâmico	Resistencia a fadiga	Satisfatorio:	
CAB20			Sim	
IAB15			Não	
DAC				

Fonte: Próprio Autor, 2020

Relativamente ao módulo dinâmico, verificou-se, nas misturas com asfalto-borracha, apresentam um valor inferior à mistura convencional. Quanto a resistência à fadiga, as misturas com asfalto-borracha apresentaram um desempenho muito superior à mistura convencional.

4.6 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PAVIMENTO MODIFICADO COM BORRACHA DE PNEUS

Segundo Santos (2013) as propriedades da borracha melhoram a qualidade do ligante asfáltico, proporcionando aumento da flexibilidade e tornando a mistura mais resistente ao envelhecimento e ao aparecimento de deformações e trincas, fato que aumenta a segurança dos usuários da via e reduz consideravelmente os

custos dos cofres públicos com a manutenção destas. O asfalto tradicional tem uma vida útil de 10 anos em média. Por ser um produto perecível sofre um processo de envelhecimento natural do ligante asfáltico. Mas, quando se miscigena e funde-se a borracha com o asfalto, sua vida útil é de 25 a 30 anos segundo Morilha e Trichês (2003). A tabela 14 mostra tais vantagens e também algumas desvantagens da utilização da borracha na composição de pavimentos asfálticos. Destacando também onde cada benefício se enquadra.

Tabela 20: Vantagens e Desvantagens do uso de pneus na composição do pavimento asfáltico

BENEFÍCIOS	VANTAGENS
TÉCNICOS	<ul style="list-style-type: none"> -Aumento da flexibilidade -Aumento da durabilidade -Maior controle da propagação prematura de trincas -Diminuição das fissuras por fadiga -Melhor aderência dos veículos ao pavimento -Redução no nível de ruído provocado pelo atrito pneu-pavimento -Aumento da vida útil do pavimento -Maior resistência ao envelhecimento e formação de trincas de roda
ECÔNOMICOS	<ul style="list-style-type: none"> -Permite a redução da espessura do pavimento -Os custos produtivos dos pavimentos empregando asfalto-borracha, em relação ao tradicional, praticamente não se alteram, analisando a longo prazo
AMBIENTAIS	<ul style="list-style-type: none"> -Inibição de criação de focos de insetos prejudiciais à saúde -Redução de lixo ocasionado pelo descarte de pneus em locais inadequados, como aterros, terrenos baldios, rios, lagos etc -Redução do uso de recursos naturais, como borracha e petróleo (asfalto), pela substituição parcial por borracha moída de pneus
	DESADVANTAGENS
ECÔNOMICOS	<ul style="list-style-type: none"> -Introdução de mais material (borracha reciclada) na usina de asfalto -Aumento da temperatura de usinagem -Pagamento de royalties para o uso de processos patenteados

Fonte: Próprio Autor, 2020

Os benefícios colocados foram apresentados na pesquisa de forma sucinta. Tendo como base os trabalhos comparados e algumas outras pesquisas que obtiveram resultados positivos na composição de um pavimento asfáltico com a incorporação da borracha. Os benefícios técnicos, como de aumento da vida útil, durabilidade, diminuição e retardamento de fadigas do pavimento se da principalmente por uma boa estabilidade e fluência, sendo classificadas como (fluência) “deslocamento na vertical apresentado pelo corpo-de-prova

correspondente à aplicação da carga máxima”. (Estabilidade) com “[...]carga máxima a qual o corpo-de-prova resiste antes da ruptura, definida como um deslocamento ou quebra de agregado de modo a causar diminuição na carga necessária para manter o prato da prensa se deslocando a uma taxa constante [...]”. Já para maior resistência ao envelhecimento e formação de trincas de roda se dá por uma boa (resistência a tração, modulo de resiliência e baixa deformação específica), aumentado ainda mais a vida útil do pavimento, devido ter a capacidade de resistir a deformações permanentes.

4.7 METODO COMPARATIVO DOS ESTUDOS ANALISADOS

Os dados representados abaixo (tabela 21) foram retirados dos resultados dos ensaios das pesquisas escolhidas na composição desse estudo.

Tabela 21: Síntese dos Estudos analisados ao decorrer dessa pesquisa

SINTESE DOS ESTUDOS ANALISADOS		1º	2º	3º	4º	5º
ENSAIOS RELACIONAD OS AOS ESTUDOS ANALISADOS	PONCENTAGEM DE BORRACHA UTILIZADA (%)	6	0,7	1 G e F	0,7 G	15
		12	1,1	2 G e F	0,7 M	20
		18	0,4	-	-	-
	ESTABILIDADE (KN)	14,3	-	-	17,734	-
		10,5	-	-	14,860	-
		10,4	-	-	-	-
	FLUENCIA (mm)	2,54	-	-	0,0457	-
		2,79	-	-	0,0406	-
		2,54	-	-	-	-
	DEFORMAÇÃO ESPECIFICA (cm/cm)	0,0000415	0,0001164	-	-	-
		0,00000732	0,0001164	-	-	-
		0,00000279	0,0001164	-	-	-
RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (Mpa)	1,44	0,694	1,14	-	-	
	1,43	0,638	1,02	-	-	
	1,39	0,769	-	-	-	
MODULO DE RESILIÊNCIA (Mpa)	5220	3345	2793	-	-	
	4480	3100	2104	-	-	
	4810	2630	-	-	-	

Fonte: Próprio Autor, 2020

Pode-se notar que os resultados comparados não estão totalmente homogêneos, devido a diversidade de pesquisas. O estudo representativo que se mostrou mais satisfatório foi a Tese de doutorado de (SPECHT, Luciano Pivoto), não somente por estar com todos os dados da coluna completos, mas sim porque seus ensaios alcançaram melhores resultados. Tornando assim, o modelo que melhor representa este estudo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como base o desenvolvimento de uma revisão integrada, sendo composta por diversas pesquisas bibliográficas que tenham como principal tema a utilização do resíduo da borracha na composição de um pavimento asfáltico. O intuito dela era correlacionar resultados extraídos de outros estudos, seja descritivos, qualitativos ou quantitativos e abordá-los através de tabelas, tendo como objeto de estudo a borracha.

Os objetivos específicos dessa pesquisa tinham finalidade a apresentação dos materiais presentes na composição do pavimento, o método utilizado, e as características físicas, mecânicas dos pavimentos com a incorporação da borracha e seus benefícios. A metodologia utilizada foi de extrair os resultados das pesquisas bibliográficas e comenta-los de maneira classificatória em relação os dados, ou seja, todos os resultados foram comentados e classificados quanto a satisfação em relação ao modelo convencional de pavimento.

Os resultados abordados, tanto descritivos em relação a abordagem dos materiais quanto quantitativo em relação ao porcentual de borracha de cada pesquisa, foram trabalhados de forma isolada e conjunta para chegar à conclusão desse estudo. O método comparativo teve com síntese o recolhimento de dados dos alguns ensaios das cinco pesquisas escolhidas, chegando a conclusão que a pesquisa com o resultados mais satisfatório era a Tese de doutorado de (SPECHT, Luciano Pivoto), a qual, obteve melhor estabilidade, fluência, menores deformações e maiores resistências a tração e modulo de resiliência.

Para que essa pesquisa se justifique de forma comercial teria que ser criada toda uma metodologia de recolhimento e processamento desse resíduo. Tal metodologia seria estipuladas por empresas privadas juntamente com o incentivo do poder público para que a gestão no processo de recolhimento, processamento e aplicação dessa borracha não fique inviável. O impacto desse investimento, aumentaria toda uma cadeia de atividades. Mais empregos, mais empresas especializadas, menor poluição desse resíduo na natureza, e uma melhor qualidade na composição do pavimento asfáltico.

Como prosseguimento nos estudos relacionados a este trabalho, propõem-se as seguintes sugestões de trabalhos futuros. Análise do comportamento

mecânico de um pavimento construído completamente com a borracha, a partir da construção de uma pista de teste, Fazer um estudo de carga e tráfego máximo que um pavimento construído com materiais reciclados pode suportar, Fazer um estudo comparativo entre um pavimento tradicional e um completamente reciclado, considerando a fatores econômicos e técnicos.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 10004 "Resíduos Sólidos", 2004

ABNT MB 164/72. Determinação do ponto de amolecimento de materiais betuminosos (método do anel e bola). Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1972.

ABTI – Associação Brasileira de Transportadores Internacionais. In: Boletim Quinzenal. No. 144 – Ano VII - 31/08/2001. Asfalto Ecológico é Utilizado pela Primeira vez no Brasil. Disponível em: Acesso em: 05/02/2002

ADHIKARI, B.; DE, D.; MAITI, S. Reclamation and recycling of waste rubber. Materials Science Centre, Indian Institute of Technology, Kharagpur 721302, Indian. ELSEVIER - Progress in Polymer Science. 22 (2000) 909-948

BAHIA, H.U.; HISLOP, W.P.; ZHAI, H.; RANGEL, A. Classification of Asphalt Binders Into Simple and Complex Binders. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists. 1998. p. 01-41.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, projetos e restauração**. São Paulo, Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, Liedi B.; MOTTA, Laura M. G.; CERATTI, Jorge A. P.; SOARES, Jorge B. **Pavimentação Asfáltica – formação básica para engenheiros**. 3ª Edição. Rio de Janeiro, Imprinta, 2010.

BERTOLLO, S.A.M.; FERNANDES JR, J.L. Benefícios da Incorporação de Borracha de Pneus em Pavimentos Asfálticos. In: XXVIII CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITÁRIA Y AMBIENTAL. 2002, Cancun. Anais...Cancun, México. 2002. p. 01-08.

Brasil. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Instrução Normativa no 001, de 18 de março de 2010. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e da outras providências. Brasília: IBAMA, 2010.

BRAZIL TIRES. Saiba tudo sobre pneus. Disponível em: . Acesso em: 19 jul. 2012.
CHOUBANE, B.; G.A. SHOLAR; J.A. MUSSELMAN; G.C. PAGE Ten-Year Performance Evaluation of Asphalt-Rubber Surface Mixes, Transportation Research Record, v. 1681, n. 0177, p. 10-18, 1999.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT. **Manual de Pavimentação Rodoviária**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 2006.

DNER ME 16/64. Densidade de materiais betuminosos . Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 1964.

ECHEVERRIA, José Antônio Santana *et al.* **AVALIAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA COM INCORPORAÇÃO DA BORRACHA DE PNEU**. 2017.

Disponível em: < file:///C:/Users/Victor%20Hugo/Downloads/8897-Texto%20do%20artigo-37542-1-10-20180212.pdf >

FILHO, José Moacir de Mendonça; ROCHA, Eider Gomes de Azevedo. **Estudo Comparativo entre Pavimentos Flexível e Rígido na Pavimentação Rodoviária**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 06, Vol. 02, pp. 146-163, Junho de 2018. ISSN:2448-0959

FONTES, Liseane *et al.* **REDUÇÃO DA ESPESSURA DOS PAVIMENTOS UTILIZANDO MISTURAS COM ASFALTO-BORRACHA**. 2009. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/17428/1/CN-41_Reduc%3%a7%c3%a3o%20da%20espessura%20dos%20pavimentos%20utilizando%20misturas%20com%20asfalto-borracha.pdf >

GOMES FILHO, C. V. Levantamento do potencial de resíduos de borracha no Brasil e avaliação de sua utilização na indústria da construção civil. 2007. 137f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2007.

GOODYEAR. Pneus. Informações técnicas. Disponível em: <<http://www.goodyear.com.br>>

HEITZMAN, M. A. State of the Practice. Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-AS-92-022, May. 1992.

LAGARINHOS, Carlos Alberto Ferreira. Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011, 299p.

MORILHA JR., A.; TRICHÊS, G. Análise comparativa de envelhecimento em laboratório de nove ligantes asfálticos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 34, 2003, Campinas. Anais... Rio de Janeiro: ABPV, 2003.

NOVICKI, R. E. E.; MARTIGNONI, B. N. V. Retortagem de pneus pelo processo Petrosix. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS. 2000, São Paulo. Anais... São Paulo, Sema, 2000.

ODA, S. Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação, Tese de D.Sc., EESC, São Carlos, SP, Brasil, 2000.

PETROFLEX - 2001. Disponível em: <<http://www.petroflex.com.br>>

Rev. Elet. Gestão e Serviços v.3 n.2/v.4 n.1, Jan./Jun. 2013

SALINI, Reus Bertolotto. **UTILIZAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS EM MISTURAS ASFÁLTICAS**. 2000. Disponível em: <file:///C:/Users/Victor%20Hugo/Desktop/TCC/TRAB%202/171246.pdf>

SANTOS, T. A. Mistura asfáltica modificada por borracha de pneus inservíveis, como alternativa sustentável, para aplicação na pavimentação. In: Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, 2., São Paulo, SP: SINGEP e S2is. Anais... , pp.1-17, 2013.

SANTOS, T. A. L. Plano de gerenciamento do pneu – resíduo: metodologia. 2002. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

SAYÃO, A. S. F. J. et al. Scrap tire – an attractive material for gravity retaining walls and soil reinforcement. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, v. 35, n. 3, p. 135-156, 2009.

SINDIPEÇAS – Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores. Levantamento da frota circulante brasileira em 2011. 2011. Disponível em: . Acesso em: 19 jul. 2012

SPECHT, Luciano Pivoto. **AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM INCORPORAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS**. 2004.

Disponível

em:<file:///C:/Users/Victor%20Hugo/Desktop/TCC/TRAB%201/000422319.pdf>

VAN BEUKERING, P. J. H.; JANSSEN, M. A. Trade and recycling of used tires in Western and Eastern Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 33, n. 4, p. 235-265, 2001.

