



CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MARIA EDUARDA CASTRO SILVEIRA

**CONCRETO COM USO DE FIBRAS DE RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU
COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL
PARA PAVIMENTO RÍGIDO**

FORTALEZA

2022

MARIA EDUARDA CASTRO SILVEIRA

**CONCRETO COM USO DE FIBRAS DE RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU
COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL
PARA PAVIMENTO RÍGIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Faculdade Ari
de Sá.

Orientadora: prof.^a Me. Francisca Lilian Cruz
Brasileiro.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Faculdade Ari de Sá
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S587c Silveira, Maria Eduarda Castro .

CONCRETO COM USO DE FIBRAS DE RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU COMO
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL PARA PAVIMENTO
RÍGIDO / Maria Eduarda Castro Silveira. – 2022.

57 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade Ari de Sá, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2022.
Orientação: Profa. Ma. Francisca Lilian Cruz Brasileiro.

1. Concreto. 2. Concreto com uso de Resíduo de Pneu . 3. Pavimento Rígido. 4. Pavimento com uso de Resíduo de Pneu . 5. Pneu como agregado miúdo. I. Título.

CDD 620

MARIA EDAUARDA CASTRO SILVEIRA

**CONCRETO COM USO DE FIBRAS DE RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU
COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL
PARA PAVIMENTO RÍGIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Faculdade Ari
de Sá.

Orientador: Prof.^a Me. Francisca Lilian Cruz
Brasileiro.

Aprovada em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Me. Francisca Lilian Cruz Brasileiro
Faculdade Ari de Sá

Prof. Me. Eduardo Araújo de Aquino
Faculdade Ari de Sá

Prof.^a Me. Rafaela Fujita Lima
Faculdade Unichristus

A minha família e a mim. Onde pude crescer em conhecimento, humildade e amor. Em que fui sustentada em incentivos, apoio e compreensão na minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado força, sabedoria, capacidade, ânimo e ter permitido a realização desse sonho.

A minha mãe, Edineuza Castro Silveira, por ter me ensinado sobre determinação e a buscar por objetivos, por ter acreditado nesse sonho junto comigo, por ter confiado na minha capacidade, pelo incentivo predisposto em todos os momentos. Agradeço o amor incondicional no meu crescimento, a dedicação em que ela teve comigo em todos os momentos e por ter abdicado da sua vida pela minha. Agradeço aos meus irmãos, Ednisia Veras de Castro e Vagner Jorge da Silveira Filho, e ao meu cunhado Benneton Gomes Vital da Costa, pelo apoio e incentivo que me foi repassado para chegar até aqui, pela paciência que tiveram e a afeição a minha dedicação e esforço a profissão.

Ao meu amado esposo, Mateus Guimarães da Silva, agradeço a paciência, a compreensão pela minha ausência, o incentivo, apoio e a confiança me passado em gestos e palavras. A admiração que é demonstrada pela profissional a qual estou me tornando, pelo encorajamento repassado a sempre buscar mais e ser mais.

A minha orientadora Francisca Lilian Cruz Brasileiro, por ter aceitado participar desse estudo junto comigo, pela paciência e calma que teve com minha ansiedade. Agradeço a dedicação e busca por conhecimento no desenvolvimento do trabalho, que portamos juntas. Agradeço aos meus Professores, Eduardo Araújo de Aquino e Ilania Maria Nascimento Mascarenhas, a disposição em complementar o meu trabalho para o meu crescimento técnico. Agradeço a querida Glecia Rozane Silveira Vieira, por ter me ajudado nos meus primeiros passos no estudo sobre a pavimentação. Agradeço a Rafaela Fujita, por ter me disponibilizado seu laboratório para ensaios importantes e decisivos deste estudo. Agradeço ao José Wellington, que foi uma pessoa de suma importância para o desenvolvimento desse trabalho aqui apresentado.

Por fim e não menos importante, aos meus amigos e colegas de trajetória da faculdade e parceiros de trabalho. Por seus incentivos e apoios, por acreditarem na minha capacidade para realização desse trabalho, por sempre me proporcionarem ânimo e confiança que eu era capaz.

“Em uma época de mudanças drásticas, são os que têm capacidade de aprender que herdarão o futuro. Quanto aos que já aprenderam e se julgam cultos, estes se descobrirão equipados para viver em um mundo que não existe mais.”

[Eric Hoffer, 1973]

RESUMO

Esta pesquisa aborda a comparação entre um pavimento de concreto simples e um pavimento de concreto com agregado miúdo modificado por uso de resíduo de pneu. Dessa forma, espera-se ajudar a melhorar o cenário de acúmulo e incorreta destinação do pneu inservível, visando a diminuição no impacto ambiental, dando ao material uma nova função. Para isso, foi feita a comparação da resistência à compressão axial, aos 7 dias e aos 28 dias, e da resistência à tração na flexão, aos 28 dias, entre a pavimentação rígida com concreto simples e a pavimentação rígida com concreto modificado com fibra de resíduos de borracha de pneu. A substituição parcial (em massa com compensação da massa específica) do agregado miúdo convencional pelo resíduo de fibra de borracha de pneu foi proposta nas seguintes proporções: 0% (REF), 25% (25RBP) e 50% (50 RBP). Tendo em vista a manutenção da consistência do concreto em todos os traços estudados, não alterando a relação água/cimento, foi utilizado um aditivo químico superplastificante à base de policarboxilatos. Observou-se que a borracha de pneu auxilia na deformabilidade do concreto, porém, diminui resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão. Logo, conclui-se que é possível substituir parcialmente o agregado miúdo convencional pelo resíduo de borracha de pneu para concreto de pavimentos rígidos, porém, o teor de substituição dependerá da situação de projeto. Como resultado do estudo, tivemos uma resistência inversamente proporcional a quantidade do teor de borracha substituído. Pudemos notar durante os ensaios que os corpos de prova tomaram formas diferentes durante os ensaios de ruptura, onde o traço REF apresentou maior fragilidade no ensaio de compressão axial e os traços com substituição do agregado (25RBP e 50RBP) mostram uma deformidade menor, a inserção da borracha de pneu promoveu uma maior deformabilidade aos concretos, criando ancoragens ao longo da peça, não desagregando-a mesmo após a ruptura.

Palavras-chave: Concreto. Concreto com uso de Pneu. Pavimento Rígido. Pavimento com uso de Pneu. Pneu como Agregado miúdo.

ABSTRACT

This research approaches the comparison between a simple concrete pavement and a concrete pavement with fine aggregate modified by the use of tire residue. In this way, it is expected to help improve the scenario of accumulation and incorrect destination of the waste tire, aiming at reducing the environmental impact, giving the material a new function. For this, the axial compressive strength at 7 days and 28 days and the flexural tensile strength at 28 days were compared between rigid paving with plain concrete and rigid paving with fiber-modified concrete. tire rubber waste. The partial replacement (in mass with specific mass compensation) of the conventional fine aggregate by the tire rubber fiber residue was proposed in the following proportions: 0% (REF), 25% (25RBP) and 50% (50 RBP). In order to maintain the consistency of the concrete in all the studied mixes, without altering the water/cement ratio, a superplasticizing chemical additive based on polycarboxylates was used. It was observed that tire rubber helps in the deformability of concrete, however, it decreases axial compressive strength and flexural tensile strength. Therefore, it is concluded that it is possible to partially replace the conventional fine aggregate by the tire rubber residue for concrete of rigid pavements, however, the replacement content will depend on the project situation. As a result of the proportional study, a strength was inversely the amount of rubber content replaced. We could notice the specimens taking different shapes during the rupture tests, where either REF present the largest test tests of axial models and the traces with replacement of the smallest value (25BP and 50R) show a deformity at the insertion of the tire rubber a greater deformability to concrete, creating anchors along the piece, not disintegrating even after rupture.

Keywords: Concrete. Concrete using Tire. Rigid Floor. Pavement with use of Tire. Tire as fine's Aggregate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Pavimento Rígido x Flexível: Detalhamento das camadas estruturais.....	23
Figura 2 – Tensões absorvidas pelos pavimentos Rígido e Flexível.....	24
Figura 3 – Tensões absorvidas pelos pavimentos Rígido e Flexível.....	24
Figura 4 – Pavimento Rígido X Pavimento Flexível – Comparação econômica.....	28
Figura 5 - Estudo das Vantagens do uso do Concreto para Pavimento Rígido.....	29
Figura 6 – Resíduo de borracha de pneu triturado em substituição ao agregado miúdo.....	35
Figura 7 – Distribuição granulométrica da areia e do resíduo de borracha de pneu.....	39
Figura 8 – Corpos de prova cilíndricos em tanque de cura.....	42
Figura 9 – Corpos de prova prismáticos em tanque de cura.....	43
Figura 10 – Ensaio de resistência à tração na flexão.....	43
Figura 11 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial.....	46
Figura 12 – Corpo de prova referencial (REF) rompido à compressão axial.....	46
Figura 13 – Corpo de prova com 25% de substituição (25RBP) rompido à compressão axial....	47
Figura 14 – Corpo de prova com 50% de substituição (50RBP) rompido à compressão axial....	48
Figura 15 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão.....	50

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Comparativo entre pavimentos Rígido e Flexível.....	26
Tabela 2 – Cimentos Recomendados DNIT 050/2004.....	37
Tabela 3 – Caracterização dos agregados.....	38
Tabela 4 – Consumos dos materiais nos concretos, em kg/m ³ , e traços unitários em massa.....	41
Tabela 5 – Consistências obtidas nos concretos.....	41
Tabela 6 – Quantidade de amostras por traço e ensaios realizados no estado endurecido dos concretos.....	42
Quadro 1 – Requisitos para a dosagem do concreto.....	32
Quadro 2 – Método de Dosagem Realizado.....	40
Quadro 3 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial.....	46
Quadro 4 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS

a.C.	Antes de Cristo
d.C.	Depois de Cristo
CP	Corpo de prova
D	Diâmetro
E	Escória (Composto do Concreto)
F	Fíler (Composto do Concreto)
f	Resistência média dos exemplares da amostra
fi	Resistências individuais
h	Horas
F _{ctM,K}	Resistência característica à tração na flexão de projeto
F _{ctM,est}	Resistência característica estimada do concreto à tração na flexão
F _{ctM,j}	Resistência média do concreto da amostra, à tração na flexão, na idade j dias
n	Número de exemplares
S'	Sulfato (Composto do Concreto)
S	Desvio padrão da resistência média da amostra, à tração na flexão
TPA	Traço Padrão
TCRB	Traço com resíduos de Borracha
Z	Pozolana (Composto do Concreto)

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
ABR	Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus
ABPv	Associação Brasileira de Pavimentação
ANIP	Agência Nacional da Indústria de Pneumáticos
ARI	Resistência característica à tração na flexão de projeto
AASHO	American Association of State Highway Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
BIM	Building Information Model
CAUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CNT	Confederação Nacional de Transporte
CP	Cimento Portland
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
FIHP	Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado
PR	Pavimentos Rígidos
PF	Pavimentos Flexíveis
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NM	Norma Mercosul
PR	Prática Recomendada
PCA	Portland Cement Association
PCS	Pavimento de Concreto Simples
RBP	Resíduo de Borracha de Pneu

LISTA DE SIMBOLOS

a/c	Relação Água Cimento
H/a	Habitante por ano
Kg/m ³	Quilograma por metro cúbico (Unidade de medida)
MPa/s	Mega Pascal/ Segundo
T/dia	Tonelada por dia
T/ano	Tonelada por ano
Kg	Quilograma
cm	Centímetros (Unidade de medida)
cm ³	Centímetros cúbico (Unidade de medida)
m	Metro (Unidade de medida)
m ³	Metro cúbico (Unidade de medida)
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
%	Porcentagem
°	Graus
°C	Graus Celsius
≥	Maior Igual
≤	Menor Igual
×	Multiplicação
∅	Diâmetro

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo Geral.....	16
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	17
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 PAVIMENTAÇÃO	19
2.1.1 HISTÓRIA DO PAVIMENTO.....	19
2.1.2 HISTÓRIA DO PAVIMENTO NO BRASIL	21
2.1.3 DEFINIÇÃO DE PAVIMENTO.....	22
2.1.4 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS	22
2.1.5 ESTRUTURA DOS PAVIMENTOS	23
2.1.6 CUSTO.....	27
2.2 CONCRETO	30
2.2.1 HISTÓRICO	30
2.2.2 UTILIZAÇÃO DO CONCRETO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	31
2.3 FIBRAS DE RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU	33
2.3.1 HISTÓRICO	33
2.3.2 UTILIZAÇÃO DA BORRACHA COMO AGREGADO MIÚDO	34
2.3.3 PROPRIEDADES ESTUDADAS ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	
3. METODOLOGIA	37
3.1 MATERIAIS	37
3.2 MÉTODOS	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	45
4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	49
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
5.1 CONCLUSÕES	51
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das maiores consumidoras de matérias-primas naturais e, segundo Abreu (2012), vem sendo responsável por aproximadamente 40 a 75% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade, gerando em torno de 145,65 toneladas por dia de resíduos. Os principais materiais consumidos pelo setor são: cimento, areia, brita, água, madeira, aço, argila, concreto e gesso. Visto que as fontes de produção destes elementos são na maioria de ação esgotável, que não se renovam, a exploração desses materiais gera um impacto ambiental negativo. É necessário gerar novas políticas que limitem a exploração dos recursos naturais, bem como o desenvolvimento de estratégias na busca de novos materiais, especialmente aqueles que permitam o aproveitamento de resíduos, que então podem ser utilizados na construção civil.

O concreto é um material construtivo amplamente disseminado. Podemos encontrá-lo em casas de alvenaria, em rodovias, em pontes, nos edifícios mais altos do mundo, em torres de resfriamento, em usinas hidrelétricas e nucleares, em obras de saneamento, até em plataformas de extração petrolífera móveis. Segundo Pedroso (2016), estima-se que anualmente são consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, o que dá, segundo a Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP, 2010), aproximadamente, um consumo médio de 1,9 tonelada de concreto por habitante por ano, valor inferior apenas ao consumo de água. Segundo Pedroso (2016), no Brasil, o concreto que sai de centrais dosadoras gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos.

O concreto também é utilizado na área rodoviária, na implantação da pavimentação rígida. Segundo Ferreira (2015), o primeiro pavimento de concreto executado foi em Bellefontaine, Ohio (EUA), em 1893. A utilização de concreto para tal fim é denominado “concreto simples” por não fazer o uso de aço, sendo necessário apenas o próprio para combater os esforços solicitantes.

A composição do concreto simples é equivalente ao concreto convencional utilizado nas edificações, tendo componentes como: agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita), água, cimento Portland (CP) e aditivo químico. Os agregados (miúdo e graúdo) devem atender às solicitações da NBR 7211 (ABNT, 2009).

Pensando em oferecer vantagens técnicas à aplicação da pavimentação rígida, há mais de 30 anos foi ponderado o uso de fibra de pneu em substituição ao agregado miúdo no concreto simples. O resíduo de borracha é um passivo ambiental produzido em larga escala mundial e

seu aproveitamento em substituição a materiais naturais não renováveis ou de lenta reposição natural, como a areia de rio, é de grande relevância. Segundo França (2015), cerca de 220 mil de toneladas de areia são extraídas por ano no Brasil.

A vertiginosa geração de resíduos sólidos é uma grande preocupação na sociedade moderna. Entre estes resíduos, estão os pneus inservíveis, que são trocados anualmente, transformando-se em um sério problema e causando impacto sanitário e ambiental. Segundo a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos – ANIP, o Brasil foi responsável pela produção de 74,3 milhões de pneus no ano de 2019 e 67,9 milhões em 2020, havendo uma redução de 8,61%. Ainda de acordo com a ANIP, em 2020 foram descartadas 380.312.00 mil toneladas de pneus (42,2 milhões de unidades).

O ciclo de decomposição do pneu inservível, segundo França H. V. (2015), leva em média 240 anos em aterros sanitários, visto que não pode ser realizada a queima, devido à emissão de gases poluentes, conveniente ao processo de vulcanização da borracha, que são extremamente tóxicos e o óleo liberado contamina o solo.

Este resíduo pode ser submetido ao processo de recauchutagem, que significa a raspagem mecânica, segundo França (2015), o Brasil ocupa o segundo lugar do mundo. O processo faz com que o restante da banda de rodagem velha do pneu transforme-se em pequenas partículas de diversas granulometrias, com formatos alongados (denominadas comumente de fibras), granular (tipo pó), exigindo no máximo uma peneiração para separação de fragmentos.

Dentro deste contexto, o presente trabalho tem por objetivo a investigação do desempenho da utilização do resíduo de borracha de pneu na composição do concreto, procurando investigar, com base em resultados experimentais, as propriedades mecânicas deste concreto. Dessa forma, espera-se contribuir com indicações de estratégias para a solução do problema de descarte do pneu após sua vida útil.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos que orientam o presente estudo são:

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar a implantação de resíduos de fibras de borracha de pneu como substituição do agregado miúdo ao concreto simples destinado à pavimentação rígida.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Verificar o comportamento do concreto simples composto pelas fibras de borracha de pneu aos esforços de tração na flexão e compressão axial;
- Comparar a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão do concreto simples de referência (sem a borracha) e do concreto adaptado com fibras de borracha de pneu;
- Analisar o teor de fibras de borracha de pneu mais indicado para aplicação do concreto em pavimentação, dentre os estudados.

1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2022), entre 2010 e 2020, a frota de veículos no Brasil cresceu 66,5%, enquanto a malha pavimentada aumentou só 9,1%. Assim, diante do aumento da frota de veículos circulando nas estradas e rodovias do Brasil, a malha viária vem apresentando, nos últimos anos, condições precárias.

Os impasses em infraestrutura rodoviária se tornaram iminentes pelas cargas de transbordo e pelo tráfego contínuo de alto fluxo. A CNT (2017) afirma que, no Brasil, 99% dos pavimentos são flexíveis e que há dois tipos de pavimento: o flexível (com o uso, na maioria dos casos, de asfalto) e o rígido (com a utilização de concreto).

O pavimento flexível apresenta deformações em curto prazo, como: trilhas de roda, fendas, escorregamento do revestimento asfáltico, subida de finos, exsudação de asfalto, afundamento e ondulações. Por outro lado, o pavimento rígido visa uma maior durabilidade do pavimento e menores manutenções na pista de rolamento, acarretando menores interrupções ao tráfego e possível economia em decorrências de poucas manutenções necessárias da via.

O estudo no pavimento rígido com incorporação de resíduos de fibras de borracha de pneu traz as vantagens do pavimento rígido, com uma maior deformabilidade trazida pelas fibras, absorvendo melhor o fluxo, evitando fissuras e melhorando a resistência ao impacto.

1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O estudo limita-se à análise do resultado da diferença em características mecânicas (resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão), sendo comparado o concreto

convencional já utilizado na pavimentação rígida e o concreto modificado com o uso de resíduo de fibra de borracha de pneu. Não foi realizado um estudo sobre a deterioração do pavimento e tempo de vida útil, sendo sugestão para trabalhos futuros. Assim, não é possível afirmar sobre a durabilidade e manutenções necessárias nestes concretos estudados.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PAVIMENTAÇÃO

A pavimentação dá início para criação de estradas e rodovias, possibilitando acessos entre pontos de partidas e chegadas. Durante o período de uso da pavimentação, denominada também como pista de rolagem ou rolamento, é necessária a manutenção do pavimento, permitindo que o tráfego viário não seja prejudicado e/ou cessado, concedendo um maior conforto e agilidade nas viagens aos seus usuários.

Mais do que tudo, o pavimento deve proporcionar a melhoria operacional para o tráfego, na medida em que é criada uma superfície mais regular, mais aderente e menos ruidosa, garantindo assim melhor conforto no deslocamento do veículo, mais segurança em condições de umidade e melhor conforto ambiental em vias urbanas e rurais (BALBO, 2007).

Ainda segundo Balbo (2007), proporcionando uma melhor condição de rolamento, automaticamente se proporciona aos usuários uma expressiva redução nos custos operacionais, tendo em vista que os custos de operação e manutenção dos veículos são diretamente ligados às condições de superfície dos pavimentos.

2.1.1 História do Pavimento

Com o propósito de aprimorar a afluência às áreas cultiváveis, fontes de recursos, templos religiosos e possibilitar a expansão territorial, o homem implementou o que chamamos de estradas, cuja lembrança mais remota vem da China. Mais tarde os romanos as aperfeiçoaram instalando pavimentos e drenagem com objetivo de aumentar sua durabilidade. Segundo Rostovtzeff (1983), tamanha foi a importância desses caminhos pavimentados para a sociedade romana que, na época áurea de Otavio Augusto (30 a.C. a. 14 d.C.), por solicitação do senado e da população do império, o senhor de Roma era responsável pela manutenção das grandes vias de circulação.

Durante a fase áurea de Roma, mais de 80.000 Km (oitenta mil quilômetros) de estradas foram construídas, permitindo aos dominadores o transporte de legiões militares e o acesso a bens disponíveis nos longínquos territórios dominados.

Segundo Balbo (2007), os romanos também procuraram estabelecer rotas por terra mais racionais, para galgar montanhas e atingir os principais pontos no mediterrâneo, combinando meios de transportes da maneira mais eficiente que estrategistas poderiam conceber.

Segundo Bernucci et al. (2010), a necessidade de manutenção e construção de novas estradas teve um impacto significativo durante o governo francês de Luís XIV, que desejava a construção de seis mil léguas de estradas. Observando as vias francesas, os ingleses aperfeiçoaram os processos e construíram as vias mais cômodas e duráveis da Europa, o que foi muito importante para o desenvolvimento da indústria e comércio no país.

Segundo Corini (1947), os egípcios estavam entre os primeiros povos a dar aos caminhos abertos uma verdadeira forma de via, construindo drenos laterais e executando até mesmo, ainda que primeiramente, a pavimentação.

Em 1870, foi construído o primeiro pavimento com revestimento betuminoso em Newark, New Jersey (EUA), por intermédio do químico belga E. J. DeSmedt; em 1876, em Washington (D.C.) se executava pela primeira vez o revestimento betuminoso do tipo sheet asphalt com material asfáltico importado de lago (ASPAHALT INSTITUTE, 1973).

Corini (1947) afirma que com a expansão da utilização do cimento Portland (CP) nas construções, na segunda metade do século XIX, o concreto viria a ser utilizado na pavimentação de vias, como ocorreu pela primeira vez em Grenoble (França), em 1876.

Segundo Balbo (2007), nos Estados Unidos, no ano de 1893, na cidade de Bellefontaine, Ohio, era construído o primeiro pavimento urbano de concreto - fato bem documentado por alguns professores europeus na primeira metade do século XX; em 1890, os pavimentos de concreto passaram a ser utilizados com frequência na Alemanha e, a partir de 1909, nos Estados Unidos, sendo que neste país já se contava, desde o início do século XIX, com uma significativa produção de asfalto derivado de petróleo por refinamento para aplicação em pavimentos.

Ainda segundo Balbo, em 1966, a Portland Cement Assosiatin (PCA) dos Estados Unidos, oferecia à comunidade rodoviária seu método de dimensionamento de pavimentos de concretos simples (placas), sem barras de transferência de cargas em juntas, fundamentado nos modelos analíticos de Westergaard e na experimentação à fadiga do concreto. Tal método seria reformulado posteriormente; em 1984, a PCA publicava novo critério para cálculo de tensões de tração na flexão em placa de concreto, desta vez, baseado no método dos elementos finitos e considerando a presença de barras de transferência de cargas em juntas; além disso, introduziu o modo de danificação por erosão de camadas granulares em base, com fundamentos empíricos, até mesmo sobre resultados de desempenho verificados na AASHO (American Association of State Highway and Transportation Officials) Road Test.

2.1.2 História Do Pavimento No Brasil

Segundo Bernucci et al. (2008), no Brasil, no governo de Mem de Sá, uma das primeiras estradas pavimentadas teve seu início em 1560, criando um caminho aberto interligando duas cidades (São Vicente ao planalto de Piratininga) e ficou conhecida como Estrada do Mar; em 1661, o governo da Capitania de São Vicente recuperou o caminho e construiu a Estrada do Mar permitindo o tráfego de veículos; em 1789, a estrada foi mais uma vez recuperada, tendo a sua pavimentação no trecho da serra feita com lajes de granito, conhecida como Calçada de Lorena, que até os dias atuais tem um trecho preservado. Parte do traçado da Estrada do Mar foi cedido para a construção da Estrada da Maioridade em homenagem ao Imperador D. Pedro II, iniciada em 1837 e concluída no ano de 1844; outra recuperação foi iniciada no ano de 1913, mas posteriormente a estrada foi abandonada devido à concorrência da linha férrea.

De acordo com Balbo (2007), em meados do século XX, era comum o emprego da expressão “macadamizar”, significando a execução de camada de macadame hidráulico ou betuminoso sobre os subleitos, pavimentando, mesmo que primariamente para os padrões atuais, as estradas de terra. A primeira experiência de expressivo porte no país durante o século XX, considerando as extensões pavimentadas e as condições geométricas gerais da rodovia, bem como a existência de registros precisos sobre a obra, ocorreu na construção do Caminho do Mar, de São Paulo a Cubatão, conduzida pela então Diretoria de Estradas de Rodagem da Secretaria de Viação e Obras Públicas do Estado de São Paulo.

Segundo Reis (1995), em 1926, o governo do Estado de São Paulo concluiu a construção de 334 km (trezentos e trinta e quatro quilômetros) de novas estradas, com emprego de vários tipos de pavimentos asfálticos, concreto e paralelepípedos.

Segundo Balbo (2007), em 1927, a estrada entre as cidades do Rio de Janeiro e Petrópolis foi pavimentada com o uso do concreto de cimento Portland, iniciando neste período o emprego do pavimento rígido no país. Documentos relatam que em 1938, na região Nordeste, iniciou-se a construção da atual BR 232, ligando Recife a Caruaru; em seguida, nos anos 50, teve início a construção da BR 324 no trecho do estado da Bahia; em 1967, começou a rodovia Presidente Castelo Branco e a Rodovia Imigrantes em 1973.

No final da década de 1950, um fato fundamental no país foi a criação de uma comissão técnica especial no âmbito do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER, com a participação do Departamento Nacional de Estrada de Rodagem do Estado de São Paulo, para

o projeto e a construção da rodovia presidente Dutra. Essa obra contribuiu para a formação de uma escola rodoviária no âmbito do extinto DNER.

2.1.3 Definição De Pavimento

Para Diogo (2008), pavimento é um revestimento sobre uma superfície, formado por camadas de diferentes características, destinado a distribuir cargas sobre um plano subjacente, apresentando uma superfície adequadamente resistente à abrasão, com textura e declividade capazes de oferecer segurança e conforto à circulação de seres vivos ou máquinas (automóvel).

Define-se como pavimento toda a estrutura composta de múltiplas camadas de espessuras variáveis assentes sobre um subleito previamente regularizado, com o objetivo de resistir aos esforços provenientes do tráfego bem como do clima, proporcionando aos usuários a melhoria nas condições de segurança, economia e conforto (DNIT, 2006).

Conforme Andrade (2005), é uma estrutura de múltiplas camadas construída sobre a terraplenagem e destinada, técnica e economicamente, a resistir aos esforços oriundos do tráfego e a melhorar as condições de rolamento.

Segundo Balbo (2007), o pavimento é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios.

2.1.4 Classificação Dos Pavimentos

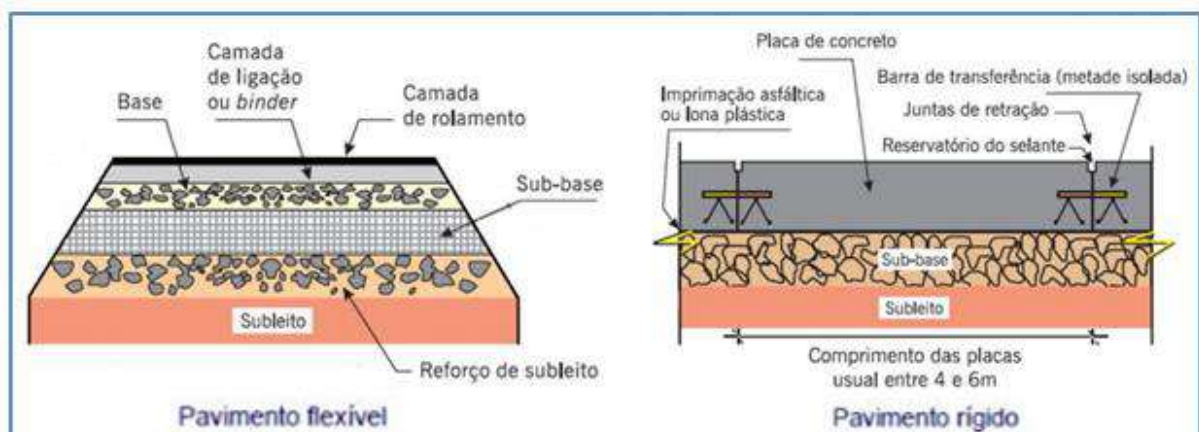
Os pavimentos são divididos basicamente em três tipos, conforme o DNIT (2006): Flexível, Rígido e Semirrígido. Este trabalho aborda a diferença entre os pavimentos flexíveis e rígidos, com ênfase na pavimentação rígida, com uso de concreto. Portanto:

- a) Pavimento flexível - PF: é o tipo de pavimento que sofre uma deformação elástica significativa em todas as suas camadas quando submetido a um esforço. Um exemplo típico é o pavimento constituído por uma camada asfáltica assente sobre uma camada de

base de brita graduada, assente sobre um subleito construído. O PF apresenta a necessidade da seguinte estrutura: Subleito; Reforço do Subleito; Sub-base; Base; Camada de ligação ou Binder; Camada de Rolamento, conforme mostrado na Figura 1.

- b) Pavimento rígido - PR: é aquele que se caracteriza por ter uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores, deste modo, ele acaba por absorver praticamente todas as tensões provenientes do esforço aplicado, como exemplo, podemos adotar pavimento constituído por placas de cimento Portland. O PR absorve e retém a carga em sua primeira camada da estrutura, posto isso as camadas subsequentes do seu arranjo não são tão afetadas e o próprio apresenta a seguinte propensão: Subleito; Sub-base; Placa de concreto, também de acordo com a Figura 1.

Figura 1 - Pavimento Rígido x Flexível.



Fonte: Augusto (2016).

2.1.5 Estrutura Dos Pavimentos

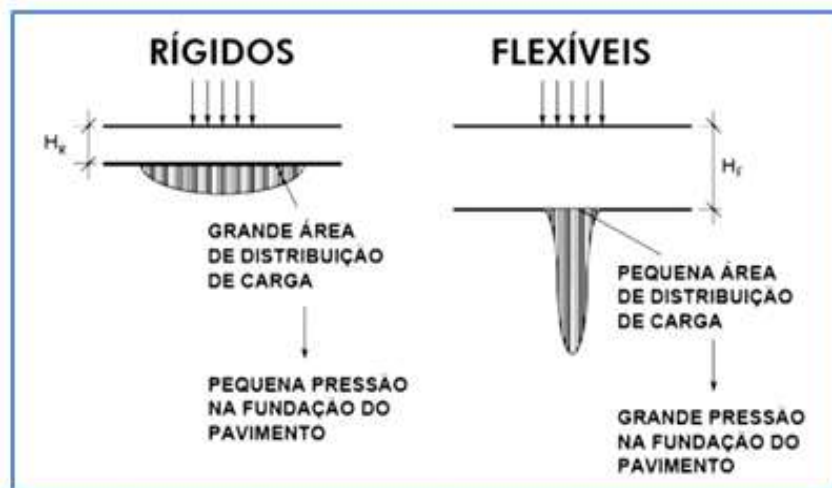
Segundo Guimarães Neto (2011), a estrutura necessária para a pavimentação flexível é mais complexa que a estrutura para a pavimentação rígida, devido à forma distinta de como as cargas são absorvidas por ambos os pavimentos; porém, apesar de estrutura mais simples, o pavimento rígido possui uma maior rigorosidade na sua metodologia de construção e na qualidade dos materiais que o pavimento flexível; o pavimento rígido, ao dispersar mais amplamente as cargas na sua estrutura, economiza em serviços como o reforço de subleito, geralmente necessário na pavimentação flexível.

Nos pavimentos flexíveis, conforme Balbo (2007), as cargas impostas sobre o revestimento geram tensões mais concentradas e, por consequência, todas as camadas sofrem

deformações elásticas, pois os materiais empregados apresentam rigidez inferior ao concreto de cimento Portland.

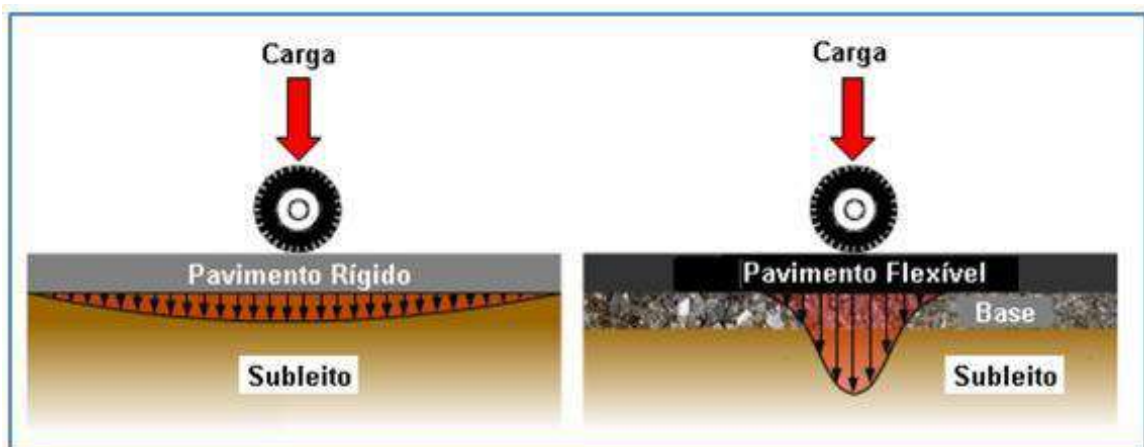
Já nos pavimentos rígidos, conforme descrito pelo DNIT (2006), as tensões das cargas são absorvidas pela primeira camada (placa de concreto) e distribuídas lateralmente, apresentando muita resistência a elevadas pressões de contato. A Figura 2 e a Figura 3 apresentam, de forma simplificada e esquemática, a comparação entre os dois tipos de pavimentos quando estão sob efeito de cargas. As mesmas figuras também demonstram que pavimentos rígidos (PR), em função da sua maior resistência e rigidez, necessitam de menor espessura total do que pavimentos flexíveis (PF), para suportar uma mesma carga.

Figura 2 – Tensões absorvidas pelos pavimentos Rígido e Flexível.



Fonte: Augusto, (2016).

Figura 3 – Tensões absorvidas pelos pavimentos Rígido e Flexível.



Fonte: Augusto, (2016).

Para Ribas (2017), o pavimento flexível apresenta maior oferta de empresas que possuem mão-de-obra, máquinas e equipamentos necessários para a execução. Já o pavimento rígido, apesar da sua utilização estar em crescimento no Brasil, a falta de empresas especializadas ocasiona erros construtivos ou até deficiências no controle tecnológico.

Segundo a Confederação Nacional de Transporte - CNT (2019), em 2019, 58.616 Km (Cinquenta e oito mil, seiscientos e dezesseis quilômetros), o que representa 67,5% das rodovias brasileiras, apresentaram algum tipo de problema no pavimento, sendo avaliadas como regular, ruim ou péssima no que diz respeito à condição da superfície do pavimento, onde os problemas estruturais e funcionais aparecem precocemente, em média, sete meses após a entrega da obra rodoviária.

O pavimento de concreto convencional, segundo Gama (2014), tem maior durabilidade e proporciona mais segurança, além de economizar em combustível e iluminação pública, onde seus benefícios proporcionam um menor custo operacional para condutores e consta um menor índice de acidentes, por possuir maior aderência entre pavimento/pneu comparado ao flexível.

Ainda de acordo com o autor supracitado, para a construção do pavimento de concreto convencional, é apresentado um custo mais elevado, em contrapartida, tem grande durabilidade e exige menos manutenções, sendo indicados como solução ideal para vias públicas e rodovias submetidas ao tráfego intenso e uso de transbordo, além de ser mais resistente às intempéries, não oxidar, não sofrer deformações plásticas, não formar trilhos de rodas por absorver maior impacto, nem buracos, geralmente encontrados em pavimentos flexíveis. Como forma de comparação entre os pavimentos rígidos e flexíveis, Bianchi et al. (2008) desenvolveram a Tabela 1, com as principais características de cada pavimento.

Tabela 1 – Comparativo entre pavimentos Rígido e Flexível.

PAVIMENTOS RÍGIDOS	PAVIMENTOS FLEXÍVEIS
Estruturas mais delgadas de pavimento	Estruturas mais espessas (requer maior escavação e movimento de terra) e camadas múltiplas
Resiste a ataques químicos (óleos, graxas, combustíveis)	É fortemente afetado pelos produtos químicos (óleo, graxas, combustíveis)
Maior distância de visibilidade horizontal, proporcionando maior segurança	A visibilidade é bastante reduzida durante a noite ou em condições climáticas adversas
Pequena necessidade de manutenção e conservação, o que mantém o fluxo de veículos sem interrupções	Necessário que se façam várias manutenções e recuperações, com prejuízos ao tráfego e custos elevados
Falta de aderência das demarcações viárias, devido ao baixo índice de porosidade	Melhor aderência das demarcações viárias, devido a textura rugosa e alta temperatura de aplicação (30 vezes mais durável)
Vida útil mínima de 20 anos	Vida útil máxima de 10 anos (com manutenção)
Maior segurança à derrapagem em função da textura dada à superfície (veículo precisa de 16% menos de distância de frenagem em superfície seca, em superfície molhada 40%)	A superfície é muito escorregadia quando molhada
De coloração clara, tem melhor difusão de luz. Permite até 30% de economia nas despesas de iluminação da via	De cor escura, tem baixa reflexão de luz. Maiores gastos com iluminação
O concreto é feito com materiais locais, a mistura é feita a frio e a energia consumida é a elétrica	O asfalto é derivado de petróleo importado, misturado normalmente a quente, consome óleo combustível e divisas
Melhores características de drenagem superficial: escoamento melhor a água superficial	Absorve a umidade com rapidez e, por sua textura superficial, retém a água, o que requer maiores caimentos
Mantém íntegra a camada de rolamento, não sendo afetado pelas intempéries	Altas temperaturas ou chuvas abundantes produzem degradação

Fonte: Bianchi et al. (2008).

2.1.6 Custo

Segundo Carvalho (2007), a produção do concreto utilizado na pavimentação rígida consome até quatro vezes menos energia que a produção do asfalto; além disso, a superfície clara do concreto contribui para a economia de iluminação pública e para a redução da temperatura ambiente, minimizando os gastos com ar-condicionado e reduzindo a poluição ambiental.

Silva Filho (2011) destaca que estudos feitos pela Portland Cement Association – PCA, confirmam uma significativa redução no consumo de combustíveis em veículos pesados quando trafegam em pavimentos rígidos em comparação com os pavimentos flexíveis, proporcionado pela superfície rígida, indeformável e estável, que cria menor resistência ao rolamento e exige menor esforço da parte mecânica dos veículos.

De acordo com o DNIT (2017), em sua planilha de custos médios gerenciais, para implantação de pavimento flexível em pista simples com faixa de 3,6m e acostamento de 2,5m com revestimento em Concreto Betuminoso Usinado a Quente - CAUQ, com 10cm de espessura para pista e acostamento, é necessário o custo médio de R\$3.159.000,00 por quilômetro. Já para a implantação de pavimento rígido em pista simples com faixa de 3,6m e acostamento de 2,5m com revestimento em Pavimento de Concreto Simples - PCS com espessura de 18cm para pista e 10cm para o acostamento, é exigido o custo médio de R\$5.430.000,00 por quilômetro.

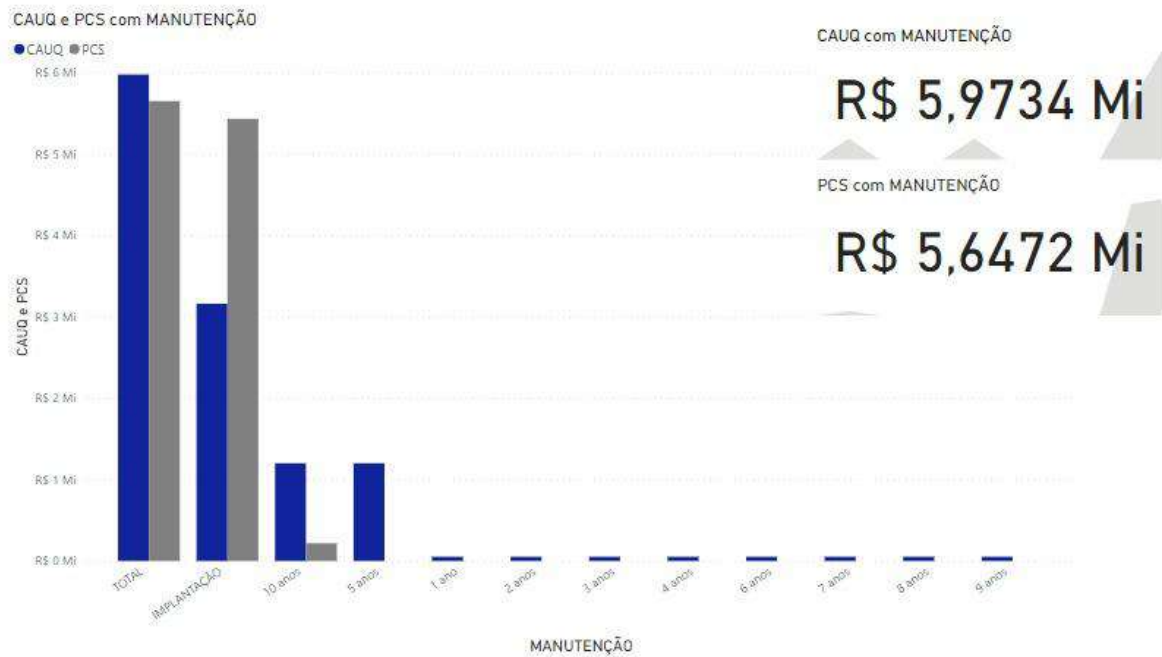
Segundo Mendonça Filho e Rocha (2018), fica evidente para o comparativo que o custo médio de implantação por quilômetro do pavimento rígido com revestimento em PCS é aproximadamente 42% mais caro do que o custo médio de implantação por quilômetro, do pavimento flexível com revestimento em CAUQ.

Referente aos custos de manutenção dos pavimentos, segundo a planilha de custos gerenciais do DNIT (2017), o pavimento flexível, ao apresentar vida útil de no máximo 10 anos, necessita de realização de serviços de conservação rotineira anual e restauração do pavimento normalmente a cada 5 anos, custando R\$ 51.800,00 e R\$ 1.200.000,00 por quilômetro, respectivamente. Já o pavimento rígido não possui os custos de conservação rotineira e restauração do pavimento na planilha do DNIT, porém, de acordo com Hallack (2008), para manutenções a cada 10 anos é necessário um valor equivalente a 4% do custo de implantação do pavimento.

A partir de valores apresentados por Mendonça Filho e Rocha (2018), compilados na Figura 4, tem-se que o custo de implantação do pavimento rígido (PCS) é maior do que o do

pavimento flexível (CAUQ); porém, o pavimento flexível requer manutenções mais onerosas no 5º ano e no 10º ano, além de manutenções mais simples a cada ano; enquanto o pavimento rígido necessita de apenas uma manutenção no 10º ano.

Figura 4 – Pavimento Rígido X Pavimento Flexível: Comparação econômica.



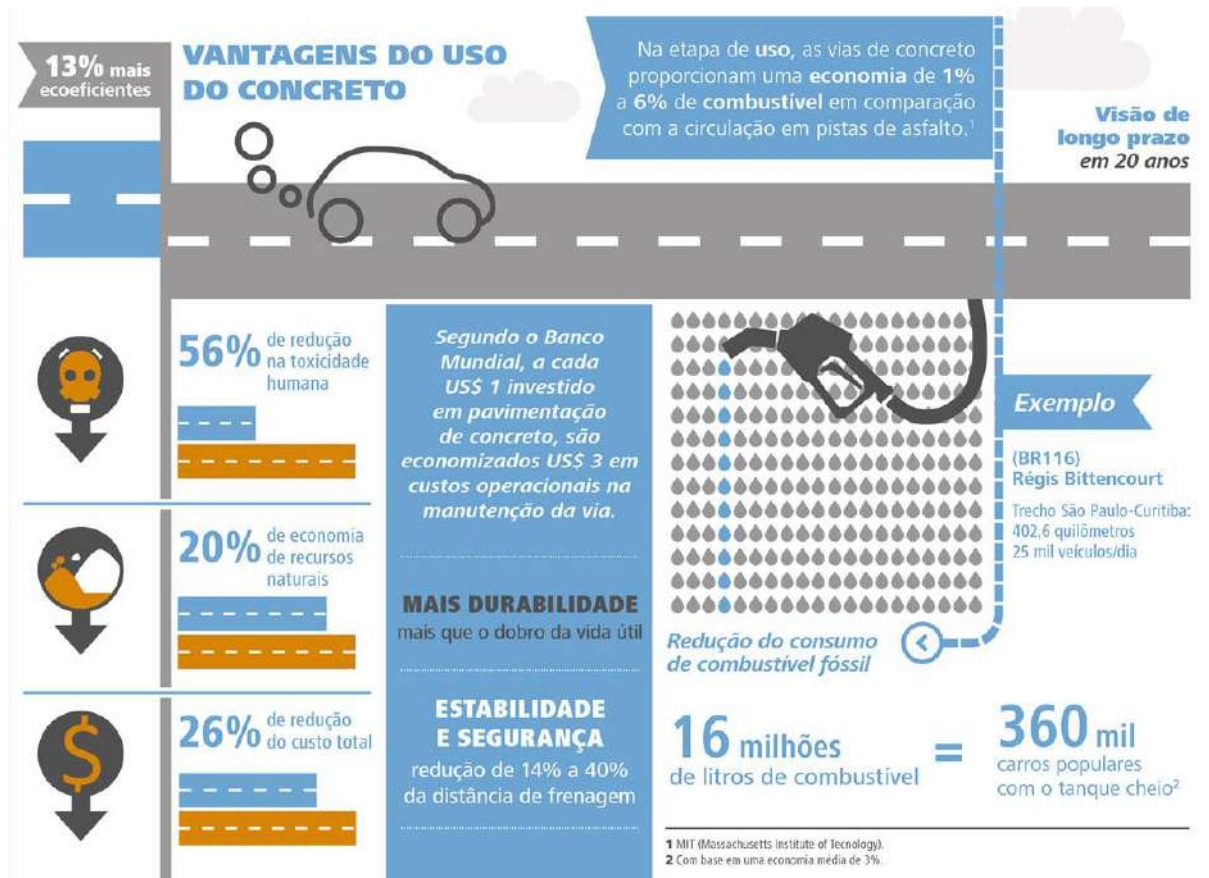
Fonte: Própria (2022).

Dessa forma, de acordo com a Figura 4, o custo total (implantação + manutenção) do pavimento flexível torna-se 5,8% mais oneroso do que do pavimento rígido ao longo de 10 anos. Portanto, considera-se que a pavimentação rígida tem um custo-benefício melhor e se torna mais vantajosa em 10 anos de uso.

Em um estudo realizado (Figura 5), na BR116 – Régis Bittencourt, no trecho que liga a cidade de São Paulo a Curitiba, analisando 25 mil veículos/dia, analisando em um período de 20 anos com a implantação do pavimento rígido para a região, notou-se que oferecia 56% de redução na toxicidade humana, 20% de economia nos recursos naturais; 26% de redução no custo total, levando em consideração o custo que apresentamos na figura 4, teríamos uma redução de R\$: 1.560.000,00, essa redução seria em comparação ao custo do pavimento flexível (Cimento Asfáltico Usinado a Quente – CAUQ) com o pavimento rígido (Pavimento de Concreto Simples). Durante esse estudo foi possível concluir que o pavimento teria mais durabilidade e estabilidade e segurança, pois o pavimento rígido têm maior aderência entre pavimento/pneu, como consequência teria uma redução de 14 a 40% da distância de frenagem evitando colisões e acidentes. A economia com a troca dos pavimentos, seria possível também no consumo de

combustível podendo ser de 1 a 6% pela circulação, o que proporciona 16 milhões de litros de combustível, o que é equivalente a 360 mil carros populares com o tanque cheio.

Figura 5 – Estudo das Vantagens do uso do Concreto para Pavimento Rígido.



Fonte: Revista Científica Semana Acadêmica (2018).

A implantação do pavimento rígido é indicada como solução ideal para vias públicas e rodovias submetidas ao tráfego intenso e ligação entre cidades/municípios/estados ou uso de transbordo, onde são vias que com o uso do pavimento flexível teriam um desgaste de abrasão, afundamento, corrugações e trilho de rodas de forma mais repentina e rotineira, demandando maiores manutenções em um curto período.

A solução apresentada no estudo acima, não é recomendada para cidades/centro urbanos, onde tem um sistema de saneamento não estruturado e precisam de reparos precoces na rede de esgoto e saneamento básico, o que ocasionaria a deterioração de uma parte do pavimento para execução da manutenção do sistema público, o que torna a implementação do pavimento inviável em perspectiva do seu custo.

2.2 CONCRETO

2.2.1 Histórico

É no Império Romano (300 anos antes de Cristo) que nasce a primeira concepção do concreto. O concreto romano é uma composição de agregados (cacos de pedras calcárias como mármore), areia, cal, pozolana e água. A pozolana é um material silicioso de origem vulcânica encontrada em abundância na época, em Pozzuoli, região do vulcão Vesúvio.

Um grande marco na história do concreto ocorreu em 1824, na Inglaterra, com a descoberta do cimento Portland, descrita por Joseph Aspdin como a queima de calcário e argila triturados e misturados a altas temperaturas, até que o CO₂ fosse liberado. O material obtido era moído obtendo-se um fino pó, porém, ainda não se tinha tecnologia para a fabricação do clínquer com as temperaturas atuais.

Na década de 1830, na Europa, o termo “concreto” foi estabelecido para uma massa sólida em que o cimento, areia, água e pedra são combinados. Em 1845, na Inglaterra, Isaac Charles Johnson, após realizar muitas pesquisas para melhorar a qualidade do cimento, aumentou a temperatura de queima da argila e calcário para 1400 °C, produzindo o clínquer pela primeira vez na história.

Durante a segunda metade do século XIX ocorreu grande evolução tecnológica na Alemanha, com estudos e ensaios sistemáticos de resistência à tração e compressão do cimento, mais qualidade do cimento e grande avanço em projetos de fornos e uniformidade do clínquer.

Na década de 1850, Joseph Louis Lambot, realizou uma série de experimentos de cimento aliado ao ferro, expondo um barco construído de cimento e ferro na Exposição Mundial de Paris, em 1855, solicitando patente de seus projetos. Para muitos historiadores Lambot é considerado o pai do Concreto Armado.

Outro grande marco ao longo da história ocorreu quando Joseph Monier executou a primeira ponte de concreto armado do mundo, em 1875, na França, com 16,50 metros de comprimento por 4 metros de largura. Monier também realizou uma série de experimentos com o concreto unido ao ferro e sem muito conhecimento teórico patenteou o método de construção de vigas de concreto com armação.

Em 1877, Thaddeus Hyatt, na Inglaterra, publicou “Um relato de alguns experimentos com concreto de cimento Portland combinado com ferro, como material de construção”. Já em 1878, patenteia a armação reticulada e peças pré-moldadas para lajes e vigas. Hyatt foi

considerado principal referência do conhecimento dos fundamentos estruturais do concreto com armação.

Em 1885, Fredeick Ransome patenteia o primeiro forno rotativo para fabricação de cimento, revolucionando a produção de cimento no mundo. É durante os anos 1920 e 1930 que surgem as primeiras usinas de concreto.

2.2.2 Utilização Do Concreto Na Construção Civil

O concreto é um dos principais componentes utilizados no cotidiano das obras civis, visto que apresenta facilidade de aplicação, tendo uma fácil locomoção e/ou produção dentro da própria obra, podendo ser utilizado em diversas situações. É um material maleável no estado fresco, podendo atingir elevada resistência à compressão axial no estado endurecido.

Alguns fatores principais possibilitam tal popularidade: a versatilidade (facilidade na produção e no manejo, uma vez que o concreto é uma substância plástica), a durabilidade, o baixo custo, a alta resistência à água, dentre outros.

Segundo o Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON, 2009), o concreto é definido como sendo um material composto, que consiste em um meio contínuo aglomerante, no qual estão mergulhadas partículas de agregados.

O aglomerante comumente utilizado, especialmente no Brasil, é o cimento Portland - CP. As partículas de agregados são divididas em dois grupos: o dos agregados graúdos (britas, com partículas maiores que 4,8 mm e menores do que 75 mm) e o dos agregados miúdos (basicamente, a areia). Com a evolução na tecnologia do concreto, também são utilizados aditivos químicos, que modificam algumas características do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, para facilitar a aplicação, melhorar trabalhabilidade, durabilidade, resistência à compressão axial, dentre outras características.

2.2.3 Concreto Na Pavimentação Viária

O concreto é o insumo utilizado na construção de pavimentos rígidos. Segundo Balbo (2012) é definido como:

Uma mistura devidamente proporcional de agregados graúdos, agregados miúdos, ligante hidráulico (tradicionalmente cimento tipo Portland, embora cimentos siderúrgicos e pozolânicos já estejam em pleno uso em alguns países) e água, além de eventual introdução de minerais durante a moagem do clínquer e de aditivos para inibir ou ressaltar, temporariamente, algumas características das misturas, sem menção especial aos aditivos plastificantes (reduzidas de água na mistura) e dos retardadores e aceleradores de pega (BALBO, 2012).

Os concretos empregados para pavimentação rígida devem apresentar uma resistência característica à tração na flexão definida no projeto, que geralmente é na ordem de 4,5 MPa ou, como no caso dos pavimentos estruturalmente armados, uma resistência característica à compressão axial, que geralmente é de 30MPa (DNIT, 2005). Segundo o manual de Práticas recomendadas, PR 1 – Pavimento de concreto: Controle Tecnológico da Qualidade da Camada de Concreto Simples (PR 1, 2005), o concreto deve passar por duas verificações, primeiro o controle preventivo e segundo o controle de verificação, onde o concreto apresentado para a pavimentação deverá estar entre os requisitos do Quadro 1.

Quadro 1 – Requisitos para a dosagem do concreto.

REQUISITOS PARA A DOSAGEM DO CONCRETO		
Características	Método De Ensaio	Valores Recomendados
Consumo mínimo de cimento	NBR 7583	320 Kg/m ³
Relação água/cimento máxima	-	0,40 a 0,50
Agregado graúdo	NBR 7211	≤ 38 mm
Abatimento	NBR NM 67	≥ 20 mm
Teor de ar incorporado	NBR NM 47	2% a 5%
Resistência característica a tração na flexão mínima	NBR 5738 NBR 12142	≥ a definir em projeto
Resistência característica a compressão axial mínima	NBR 5738 NBR 5739	≥ a definir em projeto
Exsudação	NBBR NM 102	≤ 1,5%

Fonte: Adaptado de Prática Recomendada 1 (2005).

2.3 FIBRAS DE RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU

2.3.1 Histórico

A Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIT, 2022) traz o histórico apresentado a seguir.

O pneu é um componente imprescindível ao funcionamento dos veículos por ser o ponto de contato com o solo. Desde que foi criado, no século XIX, passou por muitas mudanças até atingir a tecnologia atual.

Depois de muitos experimentos iniciados pelo americano Charles Goodyear, por volta de 1830, foi confirmado acidentalmente que a borracha cozida a altas temperaturas com enxofre mantinha suas condições de elasticidade no frio ou no calor. Estava descoberto o processo de vulcanização da borracha, anunciado somente em 1843, que possibilitou dar forma ao pneu, aumentar a segurança nas freadas e diminuir as trepidações nos carros.

Em 1845, o inglês Robert Thompson fixou uma câmara de ar de borracha a uma roda de madeira e patenteou o primeiro protótipo de pneu. Em 1888, foi fabricado o primeiro pneu para bicicletas, produzido por John Boyd Dunlop. Alguns anos mais tarde, em 1895, os irmãos Michelin foram os primeiros a patentear o pneu para automóvel e a partir disso o pneu começou a ser utilizado em larga escala.

Segundo o SINPEC, a produção brasileira de pneus ocorreu em 1934, quando foi implantado o Plano Geral de Viação Nacional. No entanto, a concretização desse plano aconteceu em 1936 com a instalação da Companhia Brasileira de Artefatos de Borracha – mais conhecida como Pneus Brasil – no Rio de Janeiro, que em seu primeiro ano de vida fabricou mais de 29 mil pneus.

Entre 1938 e 1941, outras grandes fabricantes do mundo passaram a produzir seus pneus no país, elevando a produção nacional para 441 mil unidades. No final dos anos 80, o Brasil já tinha produzido mais de 29 milhões de pneus.

Segundo a ANIP, os pneus de caminhões foram anunciados em 1919, pela Goodyear e Dunlop e, em 1946, a Michelin lançou o pneu radial. Em 1947, a Goodyear introduziu os primeiros pneus de nylon. Já a Pirelli introduziu o pneu radial largo em 1974, e a tecnologia de zero grau de nylon em 1978.

O Sindicato Nacional da Indústria de Pneumáticos, Câmaras de Ar e Camelback (SINPEC, 2022) afirma que desde então, o Brasil conta com a instalação de mais de 15 fábricas

de pneus. Hoje, da produção mundial, o Brasil é o sétimo na categoria de pneus para automóveis e o quinto em pneus para caminhão/ônibus e camionetas.

2.3.2 Utilização Da Borracha Como Agregado Miúdo

Para a produção do concreto é necessário extrair matéria prima que, na maioria das vezes, é encontrada e retirada de fontes naturais e esgotáveis, que demoram para se recompor ou reconstruir e que não são fabricadas.

O concreto convencional tem em seu traço quatro elementos básicos essenciais na sua dosagem e produção: a água, que deve ser utilizada de forma limpa para que não modifique a precisão dos aglomerantes, sem a presença de sais ou minerais pesados; o agregado graúdo, que é extraído através da britagem de rochas, por meio de detonação de minerais e passado por um processo de refinamento; o agregado miúdo, conhecido como areia, tem extração de fonte natural e não renovável, que pode ser retirado de jazidas, leito de rios e açudes; e o cimento Portland, que é o aglomerante utilizado para produção do concreto ou argamassa, obtido através de clínquer, gipsita e adições minerais.

A substituição de um agregado para produção do concreto deve atender às especificações das Normas Regulamentadoras, nomeadamente da NBR 7211 (ABNT, 2009), que traz as especificações dos agregados para concreto de cimento Portland. Tendo em vista a realização da modificação entre os agregados, deve-se atender aos critérios do agregado miúdo e realizar-se os ensaios pertinentes.

A decisão por substituir parcialmente o agregado miúdo (areia lavada de rio) pelo resíduo triturado de borracha de pneu (Figura 6) neste trabalho ocorreu através do interesse por uma utilização sustentável do montante de pneus inservíveis empilhados e sem destinação adequada nos lixões, o que acarreta uma má destinação, com uso de queimas, gerando enxofre, contaminando solos e lençóis freáticos e contribuindo para o aquecimento global. A areia, por sua vez, é um agregado não renovável e de fonte esgotável, reafirmando a importância de buscar materiais alternativos.

Figura 6 – Resíduo de borracha de pneu triturado em substituição ao agregado miúdo.



Fonte: Própria (2022).

Santos (2018) constatou no seu estudo que com a inserção de borracha de pneu ao concreto houve uma perda de resistência à compressão de até 10% em relação ao concreto referencial. No entanto, ao analisar a resistência à compressão diametral, medida indireta da tração, verificou-se que as perdas chegaram a valores menores, destacando-se os teores de resíduos entre 5 e 10%. Assim, a resistência obtida com a adição de 5 e 10% de borracha foram consideradas compatíveis com a necessidade de serviços como piso de ciclovias, blocos para meios fios e calçadas para pedestres. Constatou-se que o uso de concretos com adições de borracha de pneu pode ser uma alternativa para minimizar o risco do surgimento de fissuras, quando comparados a um concreto convencional.

Do ponto de vista ambiental, constatou-se que é possível reaproveitar os pneus ao término de sua vida útil, reduzindo assim o número de pneus no meio ambiente e proporcionando um fim mais adequado a esses resíduos (SANTOS, 2018)

Martins (2005) utilizou a borracha de pneu durante seu estudo em concreto de alto desempenho (CAD), obtendo uma defasagem na resistência à compressão, haja vista que os traços com adição de 5% de borracha apresentaram menores valores de resistência à compressão em comparação aos valores obtidos para os traços com 3% de adição, os quais por sua vez foram inferiores àqueles do traço padrão (sem substituição dos agregados). Observou-se ainda que nos corpos de prova com borracha de pneu as rupturas eram do tipo transgranular, ou seja, atravessando os agregados graúdos. Para a trabalhabilidade, observou-se que o traço com 3 e 5% de substituição por borracha fina obteve um slump com menor abatimento, já os

traços com 3 e 5% com borracha média e 3% com borracha grossa, tiveram um slump mais próximo ao traço padrão, tendo maior trabalhabilidade.

3. METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

Na construção de estradas e rodovias pode ser feita a escolha do tipo de cimento mais adequado quanto à utilização e aos critérios adotados. Segundo DNIT 050/2004, podem ser utilizados, de acordo com a Tabela 2:

Tabela 2 – Cimentos Recomendados DNIT 050/2004.

Cimentos Recomendados - DNIT 050/2004								
Tipo	Cimento Portland Comum		Cimento Portland Composto			Cimento Portland Alta Resistência Inicial	Cimento Portland Alto Forno	Cimento Portland Pozolânico
Nome	CP I	CP I S	CP II E	CP II Z	CP II F	CP V ARI	CP III	CP IV
Resistência	25	25	25	25	25	-	25	25
Resistência	32	32	32	32	32	-	32	32
Resistência	40	40	40	40	40	-	40	-

Fonte: Adaptado de DNIT 050/2004

Para a produção do concreto com uso de fibras de resíduos de borracha de pneu para pavimentação rígida desta pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais:

- Cimento II F 32 - Cimento Portland Composto com Fíler com resistência à compressão mínima de 32 MPa aos 28 dias
- Agregado miúdo natural (areia lavada de rio)
- Agregado miúdo reciclado (resíduo de borracha de pneu triturada)
- Agregado graúdo
- Aditivo químico superplastificante tipo II à base de policarboxilatos
- Água

O resíduo de borracha de pneu triturada (Figura 5) foi obtido a partir de uma renovadora da cidade de Fortaleza/CE, sendo proveniente da raspa da banda de rodagem de pneus de caminhão e ônibus. A única modificação feita no material recebido pela renovadora foi o peneiramento na #4,75 mm. Os ensaios de caracterização realizados nos materiais estão resumidos na Tabela 3, bem como as normas pertinentes e os resultados obtidos.

Tabela 3 – Caracterização dos agregados

Índice físico	Brita	Areia	Borracha de pneu	Método de ensaio
Massa específica (kg/m ³)	2597	2630	937,5	Brita - ABNT NBR 16917:2021 Areia - ABNT NBR 16916:2021 Borracha de pneu - Picnômetro
Massa unitária solta (kg/m ³)	1400	1458	368	ABNT NBR 16972:2021
Massa unitária compactada (kg/m ³)	1465	-	-	
Dimensão máxima característica (mm)	25	-	-	ABNT NBR NM 248:2003
Módulo de finura (adimensional)	-	2,31	4,26	

Fonte: Própria (2022).

Para a determinação da massa específica da borracha de pneu (α_p) foi utilizado o método do picnômetro, com 30 gramas de amostra de borracha, usando o seguinte princípio:

I. Recipiente + Água: 891g

II. Amostra: 30g

III. Recipiente + Água + Amostra: 889g

$$\alpha_p = \text{II} / [\text{II} + (\text{I} - \text{III})]$$

$$\alpha_p = 30 / [30 + (891-889)]$$

$$\alpha_p = 30 / 32$$

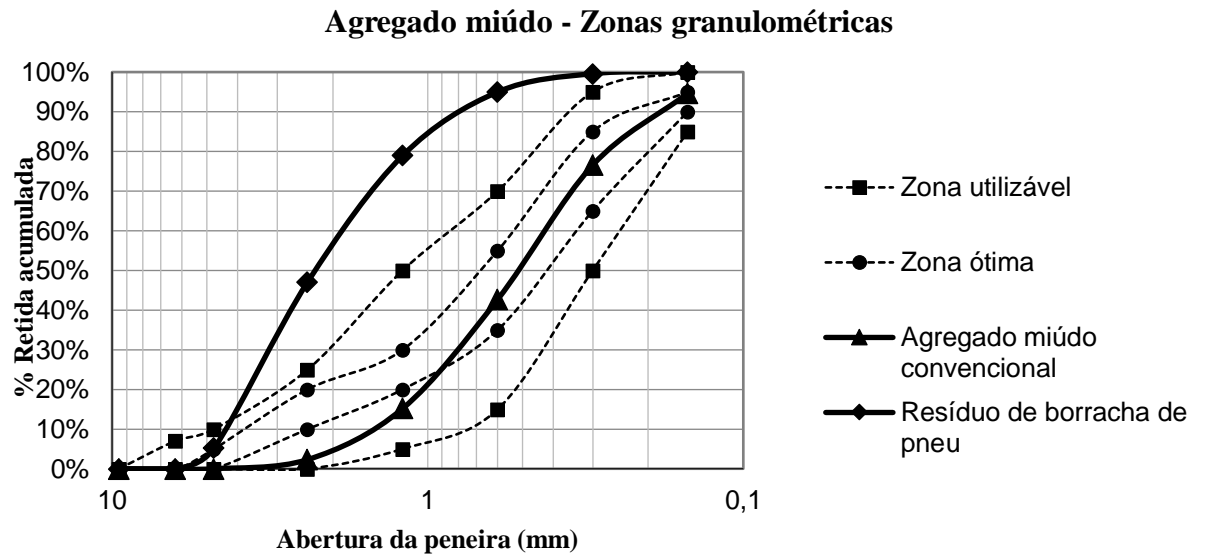
$$\alpha_p = 0,9375 \text{ g/cm}^3$$

$$\alpha_p = 0,9375 * 1000 = 937,5 \text{ kg/m}^3$$

Observa-se na Tabela 3 que o resíduo de borracha de pneu é bem mais leve do que a areia lavada de rio, tendo apenas 35,6% da massa específica do agregado natural. Por isso as substituições propostas foram feitas em massa com compensação da massa específica, promovendo uma substituição em volume real de material.

A distribuição granulométrica da areia e do resíduo de borracha de pneu é exposta na Figura 7, bem como as zonas ótima e utilizável da NBR 7211 (ABNT, 2019). Foram seguidos os procedimentos determinados na NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Figura 7 – Distribuição granulométrica da areia e do resíduo de borracha de pneu



Fonte: Própria (2022).

Na Figura 6 é possível observar que o agregado miúdo convencional se encontra predominantemente na zona ótima, enquanto o resíduo de borracha de pneu ficou acima da zona utilizável superior, não se enquadrando nas zonas especificadas na NBR 7211 (ABNT, 2019), porém, optou-se por utilizar o material como fornecido pela empresa de recapagem.

3.2 MÉTODOS

A fase laboratorial deste estudo foi dividida em quatro etapas, constando: caracterização dos materiais (agregado miúdo, agregado graúdo e resíduo de borracha); determinação da dosagem do concreto, segundo o método da Associação Brasileira de Cimento Portland; confecção do concreto e moldagem dos corpos de prova e realização dos ensaios mecânicos. Os parâmetros de dosagem do concreto convencional, bem como os consumos dos materiais, estão expostos no Quadro 2.

Quadro 2 – Método de Dosagem Realizado.

Método de Dosagem Realizado		
$F_{cj} = F_{ck} + 1,65 * S_d$	$F_{C28} = 32 + 1,65 * 4$	$F_{C28} = 38,6\text{MPa}$
Consistência:		
$90 \pm 10 \text{ mm}$		
Relação água/cimento:		
$a/c = 0,45$		
Consumo de Água:		
$C_a = 205\text{l/m}^3$		
Consumo de Cimento:		
$C_c = C_a/a/c$	$C_c = 205/0,45$	
$C_c = 455,56\text{Kg/m}^3$		
Consumo de Brita:		
$C_b = V_b * \rho$	$C_b = 0,730 * 1465$	
$C_b = 1069,45\text{Kg/m}^3$		
Consumo de Areia:		
$C_m = \alpha_m * V_m$	$C_m = 2630 * 0,235$	
$C_m = 618,05\text{Kg/m}^3$		
$V_m = 1 + \left(\frac{C_c}{\alpha_c} + \frac{C_b}{\alpha_b} + \frac{C_a}{\alpha_a} \right)$	$V_m = 1 + \left(\frac{455,56}{3100} + \frac{1069,45}{2597} + \frac{205}{1000} \right)$	
$V_m = 0,235$		
Traço unitário em massa:		
$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : \frac{C_a}{C_c}$	$\frac{455,56}{455,56} : \frac{618,05}{455,56} : \frac{1069,45}{455,56} : \frac{205}{455,56}$	$1:1,36:2,35:0,45$

Fonte: Própria, (2022).

A relação água/cimento prevista na dosagem do concreto de referência era de 0,45, porém, adicionou-se água para ajuste na consistência especificada. Dessa forma, alterou-se a relação água/cimento para 0,49. Após os ajustes necessários no traço referencial, calcularam-se os traços modificados fazendo a compensação da massa específica do resíduo de borracha de pneu e da areia natural, promovendo uma substituição em volume real. Foram confeccionados 3 tipos de traços:

- REF – Traço denominado de referência, utilização de concreto convencional;
- 25RBP – Traço com 25% de substituição do agregado miúdo pelo resíduo de borracha de pneu;
- 50RBP – Traço com 50% de substituição do agregado miúdo pelo resíduo de borracha de pneu.

A aquisição da Fibra de Resíduo de Borracha de Pneu ocorre em Fábrica de pneus para automóveis, esse agregado não é comercializado de forma ampla e de pronta entrega. As Fábricas de Pneu desenvolvem o processo de raspagem mecânica (recauchutagem) do pneu, onde as fibras são a sobra de um processo de sucção da ação de raspagem da bandagem e realizada a suga do material remanescente da raspa, onde não são comercializado e sua sobra é descartada aos lixões, tendo seu preço um valor desprezível, no qual as Indústrias Pneumáticas doam as sobras para quem tenha interesse ou propriedade no uso.

No intuito de não modificar a relação água/cimento para os traços modificados, os ajustes na consistência foram feitos com aditivo químico superplastificante tipo II. Os consumos dos materiais, em kg/m³, e os traços unitários em massa para todos os concretos produzidos estão expostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Consumos dos materiais nos concretos, em kg/m³, e traços unitários em massa

	Cimento	Areia	Borracha de pneu	Brita	Água	Aditivo	Traço unitário em massa
REF	447,51	608,62	-	1051,65	219,28	-	1:1,36:2,35:0,49
25RBP	445,59	454,50	57,93	1047,13	218,34	0,12254	1:1,02:0,13:2,35:0,49:0,000275
50RBP	445,79	303,14	111,45	1047,61	218,44	0,24519	1:0,68:0,25:2,35:0,49:0,00055

Fonte: Própria (2022).

Para verificar a consistência do concreto no estado fresco realizou-se o ensaio do abatimento do tronco de cone, segundo o que estabelece a NBR 16889 (ABNT, 2020). Em todos os traços respeitou-se a consistência especificada de 90 ± 10 mm. Os valores exatos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Consistências obtidas nos concretos

Consistência	
REF	95 mm
25RBP	93 mm
50RBP	91 mm

Fonte: Própria (2022).

Após a obtenção da consistência especificada, foram moldados os corpos de prova cilíndricos e prismáticos, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016). A quantidade de amostras e os ensaios realizados no estado endurecido para todos os concretos estão na Tabela 6.

Tabela 6 – Quantidade de amostras por traço e ensaios realizados no estado endurecido dos concretos

Tipo de corpo de prova	7 dias	28 dias	Ensaio	Método de ensaio
Cilíndrico	2 amostras	2 amostras	Resistência à compressão axial	ABNT NBR 5739:2018
Prismático	-	4 amostras	Resistência à tração na flexão	ABNT NBR 12142:2010

Fonte: Própria (2022).

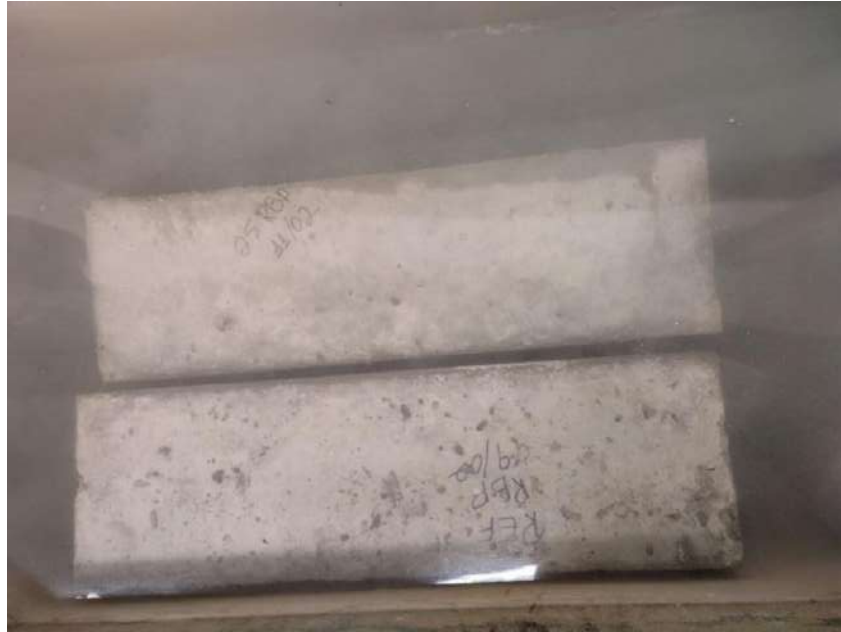
Os corpos de prova foram submetidos à cura imersa em tanque com água saturada de hidróxido de cálcio até a data dos ensaios, conforme recomendação da NBR 5738 (ABNT, 2016). A Figura 8, ilustra esse processo nos corpos de prova cilíndricos, enquanto a Figura 9, mostra os prismáticos.

Figura 8 – Corpos de prova cilíndricos em tanque de cura



Fonte: Própria (2022).

Figura 9 – Corpos de prova prismáticos em tanque de cura



Fonte: Própria (2022).

Para o ensaio de resistência à tração na flexão, a máquina de ensaio deve ser equipada com um dispositivo de flexão que assegure a aplicação da força perpendicularmente às faces superior e inferior do corpo de prova, sem excentricidades, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Própria (2022).

A NBR 12655 (ABNT, 2022) recomenda que para o ensaio de resistência à compressão axial seja adotado o maior valor obtido entre as amostras ensaiadas. Essa mesma premissa foi utilizada nos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados de ensaio de resistência à compressão axial estão apresentados no Quadro 3.

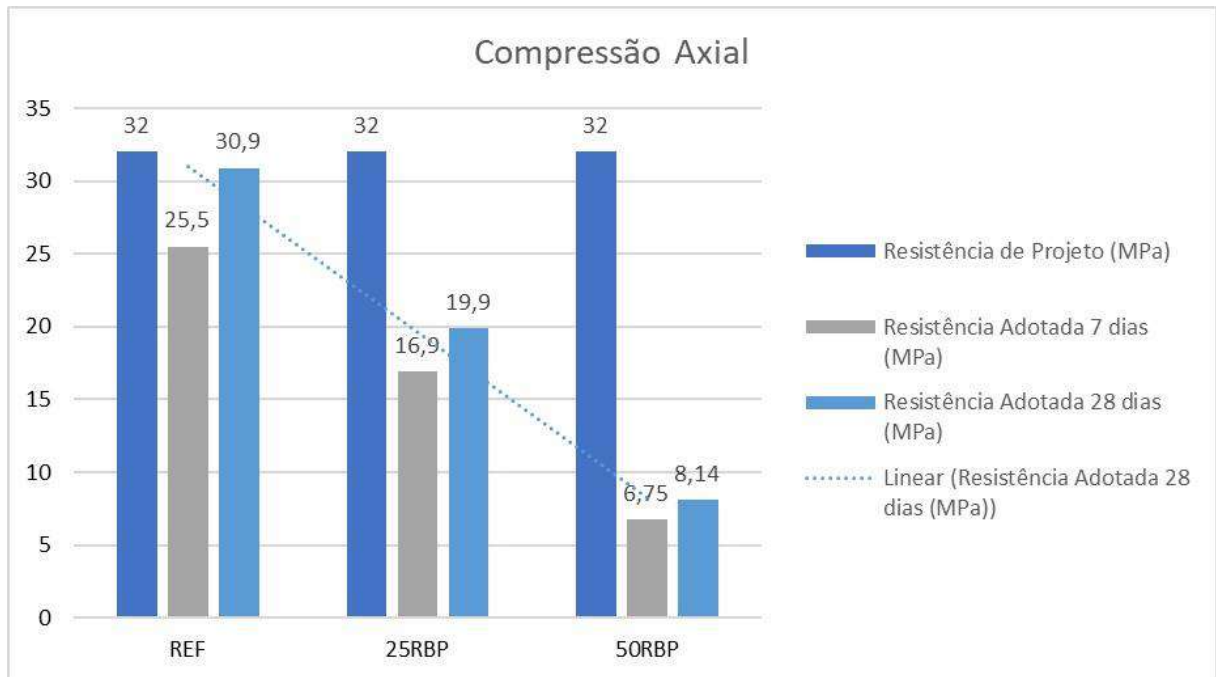
Quadro 3 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial

Traço	Resistência de projeto (MPa)	Abatimento (mm)	Resistência obtida (MPa)	Resistência adotada (MPa)
REF 7 dias	-	95	25,53	25,5
	-		24,31	
REF 28 dias	32		30,94	30,9
	32		28,93	
25RBP 7 dias	-	93	16,93	16,9
	-		16,25	
25RBP 28 dias	32		17,04	19,9
	32		19,85	
50RBP 7 dias	-	91	6,75	6,75
	-		6,60	
50RBP 28 dias	32		8,14	8,14
	32		7,94	

Fonte: Própria, (2022).

No Quadro 3 é possível observar que a substituição parcial da areia natural pelo resíduo de borracha de pneu acarretou quedas nos valores de resistência à compressão axial obtidos em relação ao concreto referencial, sendo da ordem de: 33,7% aos 7 dias e 35,6% aos 28 dias para o concreto com 25% de substituição (25RBP); 73,5% aos 7 dias e 73,7% aos 28 dias para o concreto com 50% de substituição (50RBP). Em relação ao concreto 25RBP, o concreto 50RBP apresentou queda de 60,1% aos 7 dias e 59,1% aos 28 dias. A Figura 11, ilustra os resultados de resistência à compressão axial obtidos.

Figura 11 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Própria, (2022).

Durante o ensaio de resistência à compressão axial observou-se que a ruptura dos corpos de provas tomou formas diferentes, não apenas pela carga suportada por estes. A ruptura do concreto referencial ocorreu de maneira mais frágil, sem aviso, enquanto os concretos modificados apresentaram deformações visíveis antes da ruptura. A Figura 12, ilustra um dos corpos de prova do concreto referencial (REF) rompido.

Figura 12, – Corpo de prova referencial (REF) rompido à compressão axial



Fonte: Própria, (2022).

Os traços denominados 25RBP e 50RBP apresentaram uma resistência à compressão menor do que o concreto referencial (REF), porém, a inserção da borracha de pneu promoveu uma maior deformabilidade aos concretos, criando ancoragens ao longo da peça, não desagregando-a mesmo após a ruptura. A Figura 13, traz um dos corpos de prova rompidos à compressão para 25% de substituição (25RBP) e a Figura 14, mostra o concreto com 50% de substituição (50RBP).

Figura 13 – Corpo de prova com 25% de substituição (25RBP) rompido à compressão axial



Fonte: Própria, (2022).

Figura 14 – Corpo de prova com 50% de substituição (50RBP) rompido à compressão axial



Fonte: Própria (2022).

As diminuições nos valores de resistência à compressão axial foram de grandes proporções, porém, conseguiu-se uma maior deformabilidade do concreto, o que também pode ser interessante para um revestimento de pavimentação. Logo, a aplicabilidade dos concretos modificados dependerá das exigências de projeto.

4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os resultados de ensaio de resistência à tração na flexão estão apresentados no Quadro 4, todos aos 28 dias.

Quadro 4 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão

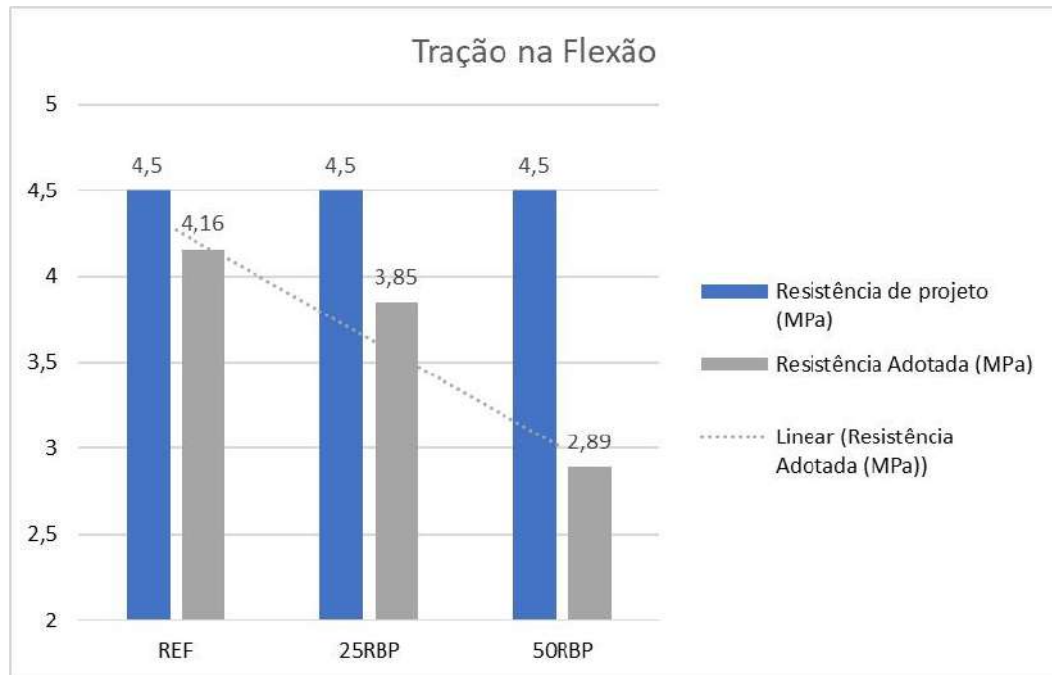
Traço	Resistência de projeto (MPa)	Abatimento (mm)	Resistência obtida (MPa)	Resistência adotada (MPa)
REF 28 dias	4,5	95	3,89	4,16
			4,16	
			4,12	
			4,11	
25RBP 28 dias	4,5	93	3,12	3,85
			3,51	
			3,85	
			3,49	
50RBP 28 dias	4,5	91	2,89	2,89
			2,73	
			2,69	
			2,79	

Fonte: Própria, (2022).

No Quadro 4 observa-se que a substituição parcial da areia natural pelo resíduo de borracha de pneu também diminuiu os valores de resistência à tração na flexão obtidos em relação ao concreto referencial, sendo de: 7,5% para o concreto com 25% de substituição (25RBP); 30,5% para o concreto com 50% de substituição (50RBP). Em relação ao concreto 25RBP, o concreto 50RBP apresentou queda de 24,9%.

Nota-se, portanto, que as diminuições na resistência à tração na flexão não seguem as mesmas proporções da resistência à compressão axial. Estruturalmente falando, os pavimentos estão mais submetidos à tração na flexão do que à compressão axial. A Figura 15, ilustra os resultados de resistência à tração na flexão obtidos.

Figura 15 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Própria, (2022).

De acordo com os resultados de resistência à compressão axial e de resistência à tração na flexão apresentados, nota-se que quanto maior o percentual de substituição do agregado miúdo natural pelo resíduo de borracha de pneu menor será a resistência mecânica obtida.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Percebeu-se que a introdução da fibra de resíduo de borracha de pneu ao concreto convencional aumentou a deformabilidade do concreto e promoveu uma melhor aderência entre seus componentes. Porém, a substituição parcial da areia natural pelo resíduo de borracha de pneu causou diminuições na resistência à compressão axial e na resistência à tração na flexão, em menor proporção neste último. Dessa forma, o uso dos teores de substituição adotados neste estudo dependerá das situações de projeto.

Observou-se também que a borracha de pneu altera a consistência do concreto, sendo necessário o uso de aditivo químico superplastificante para manutenção desta, porém, em pequenos teores.

No decorrer do estudo apresentado foram propostos dois teores de substituição ao agregado miúdo convencional (areia lavada de rio), em volume real, de 25% (25RBP) e 50% (50RBP), além do traço referencial (REF) para comparação dos resultados obtidos.

Conclui-se, portanto, que o teor de substituição mais indicado dentre os estudados foi o de 25% (25RBP), visto que apresentou somente 7,5% de diminuição na resistência à tração na flexão em relação ao concreto referencial. Como essa característica mecânica é a mais solicitada na situação de uso do pavimento, acredita-se que os resultados obtidos foram satisfatórios para um teor de substituição interessante.

Verificamos também que é possível a aplicação da fibra de resíduo de borracha de pneu ao concreto destinado ao pavimento rígido sem atuar como substituição parcial ao agregado miúdo. Para aplicabilidade e funcionalidade do pavimento rígido seria acrescida o agregado reciclado, permitindo maior elasticidade do pavimento, tendo menores fissuras, retrações, trilho de roda e menor absorção de impacto, ocasionando menos manutenções e interrupção ao tráfego e congestionamento com obras de reparos.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que para trabalhos futuros adotem-se teores de substituição intermediários aos deste estudo, já que de 25% para 50% há uma grande diferença. Também sugere-se testar a borracha em adição ao agregado miúdo convencional, em pequenos teores. Além disso, também

é importante testar o módulo de elasticidade desses traços modificados, para quantificar o aumento na deformabilidade desses concretos.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, S. H. **Pneus inservíveis: Alternativas possíveis de utilização. Monografia apresentada ao curso de graduação em Ciências Econômicas.** Universidade Federal De Santa Catarina. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. ABCP: **Estradas de concreto - Este é o caminho do futuro.** (2012).

ASPHALT INSTITUTE – **Manual Del asfalto.** Trad. Do inglês: Manuel Velaquez, Bilbao: Urmo 1973.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR 16972 - Agregados:** Determinação da massa unitária e do índice de vazios, (2021).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR NM 47 - Concreto:** Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico, (2002).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR 16916 - Agregado miúdo:** Determinação da densidade e da absorção de água. (2021).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR 16917 - Agregado graúdo:** Determinação da densidade e da absorção de água, (2021).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR 16889 – Concreto:** Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, (2020).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR NM 102 – Concreto:** Determinação da exsudação. Rio de Janeiro, (1996).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR NM 248 – Agregados:** Determinação da composição granulométrica, (2003).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR 5738 – Concreto:** Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, (2015).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR 5739 – Concreto:** Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, (1994).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR 7211 – Agregado Para Concreto - Especificação,** (2009).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR 7583 – Execução de Pavimentos de Concreto Simples Por Meio Mecânico,** (2003).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR 11768 – Aditivos Químico para concreto de cimento Portland, requisitos** (2019).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR 12142. Concreto:** Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos, (2010).

Associação Nacional Industrial de Pneumáticos – **ANIP**, (2021).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1074**. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. Philadelphia, (1998).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 78**. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), (2002).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 792**. Standard Test Method for Effects of Heat Aging on Weight Loss, Cracking, and Chalking of Elastomeric Sealants (2015).

ANDRADE, T. – **Tópicos sobre durabilidade do concreto**. In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, (2005). Cap. 25.

BALBO, J. T. – **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. Oficina de Textos, 1. Ed., São Paulo, SP, (2007).

BALBO, José Tadeu – **Pavimentos de Concreto**. São Paulo, Oficina de Textos, (2009).

BERNUCCI, L. L. B. – **Expansão e construção de solos tropicais compactados e suas aplicações às obras viárias: classificação de solos tropicais com base na expansão e contração**. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, (1987).

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa – **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2a Edição. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, (2006).

BUNDER, J.: **O Concreto: Sua Origem e sua História** - Artigo científico, Pós-graduação – Universidade de São Paulo, (2016).

CARDOSO F. C. A.; GALLATO L. S.; GUADAGNIM R. M. – **Estimativa de geração de resíduos da construção civil e estudo de viabilidade de usina de triagem e reciclagem** – Revista Brasileira de Ciências Ambientais (março, 2014).

CARVALHO, Marcos Dutra de. – **Pavimento de Concreto: Reduzindo o Custo Social**. São Paulo, (2007).

CNT. Confederação Nacional de Transportes. 2022.

Confederação Nacional de Transporte – **Pesquisa CNT de Rodovias** (2019). Compromisso Empresarial para Reciclagem – CEMPRE.

CONAMA – Resolução N° 307.

CORINI, F. – **Scienza e tecnica dellecostruirioulstradall e ferroviarie**. Milano: EditoreUlricoHoelpli, (1947).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT 037/2004 – Pavimento rígido:** Água para amassamento do concreto de cimento Portland, Ensaio comparativos, Método de ensaio, (2004).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT 046/2004 – Pavimento rígido:** Selante de juntas, Especificação de material, (2004).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT 049/2004 – Pavimento rígido:** Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-deslizante, Especificação de serviço, (2004).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT 050/2004 – Pavimento rígido:** Cimento Portland Especificação de material, (2004).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT 053/2004 – Pavimento rígido:** Determinação da retração de concreto por secagem, Método de ensaio, (2004).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT 054/2004 – Pavimento rígido:** Estudos de traços de concreto e ensaios de caracterização de materiais, Procedimento, (2004).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT. Manual de drenagem de rodovias.** Publicação IPR 724. 2 ed. Rio de Janeiro, (2006a).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT. Manual de drenagem de rodovias.** Publicação IPR-719.3. ed. Rio de Janeiro, (2006b).

DIOGO, Francisco José d'Almeida. **Manual de Pavimentação Urbana – Drenagem: Manual de Projetos.** Rio de Janeiro, (2008).

ELDIN N. N. E.; SENOUCCI A. B. – “**Rubber – Tire Particles as concrete Aggregate**”. Journal of Materials in Civil Engineering, (1993).

FIGUEIREDO D. A. G. S. – **Concreto de cimento Portland com borracha de pneus,** (2008).

MENDONÇA FILHO, José Moacir de; 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, (2018).

FRANÇA H. V – **O aproveitamento de resíduos de borracha em estacas escavadas in loco é totalmente viável do ponto de vista técnico,** (2018).

GAMA L. L. V. – **Critérios de escolha: análise de pavimentos rígidos versus pavimentos flexíveis,** (2014).

GUIMARÃES NETO, Guilherme Loreto – **Estudo Comparativo entre a Pavimentação Flexível e Rígida**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade da Amazônia, Belém, (2011).

GRANZOTTO L. – **Concreto com adições de borracha: Uma alternativa ecologicamente viável**, (2010).

HALLACK, Abdo. – **Competitividade do Pavimento de Concreto**. Seminário de Pavimentos Urbanos, (2008).

IBRACON – **Concreto: material construtivo mais consumido no mundo – Revista Concreto & Construções**, (2009).

LUI K. J. – **Aplicação de métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários ao aeroporto de Santo Ângelo – RS**, (2018).

MARTINS, F. R. I. Trabalho de Conclusão de Curso - **Concreto de Alto Desempenho com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu**, 2005.

MEZZOMO H. – **Análise comparativa entre um pavimento de concreto simples e um flexível para a duplicação da rodovia BR-386/RS**, (2014).

PINTO, Salomão.; PREUSSLER, Ernesto – **Pavimentação Rodoviária – Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 1a ed. Rio de Janeiro: Copiarte, (2001).

PRÁTICA RECOMENDADA. **PR 1 – Pavimento de Concreto**, (2005).

PRÁTICA RECOMENDADA. **PR 5 – Os Dez Mandamentos Da Pavimentação Rígida**, (2005).

PITTA, Márcio Rocha – **Construção de Pavimentos de Concreto Simples**. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, (1998).

REIS, Nestor Goulart dos – **Memória do transporte rodoviário: desenvolvimento das atividades rodoviárias de São Paulo**. São Paulo:CPA, (1995).

RIBAS, Leandro Carlos – **Custo-Benefício na Execução de Pavimentos Rígidos**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tuiuti do Paraná, Curitiba, (2017).

ROSTOVTZEF, M. – **História de Roma**. 5 ed. Tradução de: Waltenir Dutra. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, (1983).

SANTOS, M. R. Trabalho de Conclusão de Curso - **Sugestões de Aplicação Concreto Borracha em Obras Civis**, 2018.

SEBRAE – **Sustentabilidade**, boletim de tendências (janeiro, 2014).

SILVA FILHO, Augusto Lins e. – **Estudo Comparativo de Viabilidade Técnica e Econômica Entre Pavimentos Rígido e Flexível Aplicados a Rodovia BR-408/PE**. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade do Vale do Ipojuca – FAVIP, Caruaru, (2011).

SOUZA, R. M.; MAGALHÃES, R. R.; CAMPOS, A. T. – **Modelo neuro-fuzzy para predição do aporte de energia de diferentes dosagens de concreto em edificações** – Revista Ambiente Construído (Abril, 2021).

TOUTANJI, H. A. – **The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. Cement & Concrete Composites**, (1996).

Votorantim – **Concreto Ecológico**, Engemix, (2019).