



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Giselle Maria Santiago da Silva

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
CONSTITUÍDAS DE REJEITO DE QUARTZITO FOLIADO E
ASFALTO BORRACHA PARA USO EM PAVIMENTOS
RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS**

Ouro Preto

2022

Avaliação do Desempenho de Misturas Asfálticas Constituídas de Rejeito de Quartzito
Foliado e Asfalto Borracha para uso em Pavimentos Rodoviários Flexíveis

Giselle Maria Santiago da Silva

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 13/06/2022

Área de concentração: Pavimentação e Transportes

Orientador: Prof. M.Sc. Hebert da Consolação Alves

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586a Silva, Giselle Maria Santiago da.
Avaliação do desempenho de misturas asfálticas constituídas de rejeito de quartzito foliado e asfalto borracha para uso em pavimentos rodoviários flexíveis. [manuscrito] / Giselle Maria Santiago da Silva. - 2022.
70 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Me. Hebert da Consolação Alves.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Quartzito. 2. Pavimentação rodoviária. 3. asfalto borracha. I. Alves, Hebert da Consolação. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Giselle Maria Santiago da Silva

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS CONSTITUÍDAS DE REJEITO DE QUARTZITO FOLIADO E ASFALTO BORRACHA PARA USO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Aprovada em 13 de junho de 2022

Membros da banca

Eng^o M.Sc. - Hebert da Consolação Alves- Orientador -Universidade Federal de Ouro Preto
Prof^o D.Sc. - Rodolfo Gonçalves Oliveira da Silva - Instituto Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Prof^o D.Sc. Felipe de Campos Loch - Universidade Federal de Ouro Preto

Hebert da Consolação Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 20/06/2022



Documento assinado eletronicamente por **Hebert da Consolacao Alves**, **TECNICO DE LABORATORIO AREA**, em 26/07/2022, às 16:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0368105** e o código CRC **A3328A64**.

Aos meus pais, Edna e Nelson, pelo amor incondicional, exemplo de vida e por me apoiarem sempre na realização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por todas as bênçãos que vem me concedendo, por iluminar os meus caminhos e por sempre me amparar.

Ao meu orientador, Hebert da Consolação Alves, pelo tempo que dispôs a contribuir com este trabalho, pelas orientações, conhecimento, amizade e palavras de incentivo em momentos de necessidade.

Ao Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Escola de Minas, por todo auxílio durante as realizações dos ensaios laboratoriais. Aos alunos, bolsistas e técnicos que compõe a equipe, meu muito obrigado.

A RG Pedras, pelo fornecimento do material para a realização desta pesquisa.

A todos os professores pelos ensinamentos durante toda a graduação.

À Universidade Federal de Ouro Preto e à Escola de Minas, por toda estrutura, tradição e qualidade de ensino.

A todos os meus amigos e companheiros de curso, que fizeram esta caminhada ser mais leve.

A meus pais e em especial, minha mãe Edna, por sempre colocar a educação como fator primordial em nossas vidas. Aos meus irmãos, Aline e Edgard por sempre segurarem minha mão e especial minha irmã Camila que ajudou tanto na realização deste trabalho.

Ao Rogério, pelo carinho, apoio, paciência e incentivo. Obrigado por ter entendido inúmeros momentos de estresse e ansiedade e ser meu porto seguro.

A toda minha família e amigos, por todo apoio recebido ao longo desses anos e entender alguns momentos de ausência.

RESUMO

O setor de rochas ornamentais tem contribuído para a degradação ambiental e tem sido responsável pela geração de uma grande quantidade de resíduos. Outro material com grande impacto são os resíduos da borracha de pneus. A utilização desses materiais alternativos em misturas asfálticas tem por intuito minimizar danos ao meio ambiente. Visando o conceito de desenvolvimento sustentável, este trabalho tem como proposta a produção de um revestimento asfáltico utilizando como agregado o rejeito de quartzito e o ligante asfáltico constituído por borracha de pneus. O objetivo é analisar o desempenho mecânico da mistura asfáltica quando comparada com outras misturas de referência também composta por asfalto borracha. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização do agregado e das misturas, conforme normas vigentes do Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes – DNIT que tratam sobre misturas asfálticas. Para a caracterização do agregado apenas o resultado do ensaio de Abrasão Los Angeles e equivalente de areia não foram satisfatórios. A confecção dos corpos de prova foi feita de acordo com a metodologia Marshall de dosagem de misturas asfálticas e após obter os parâmetros volumétricos foi possível determinar o teor ótimo da mistura estudada. A caracterização mecânica foi realizada por meio de ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR) e determinação da estabilidade e fluência Marshall. Para todos os ensaios supracitados, os resultados foram satisfatórios. Portanto, a indicação que a mistura asfáltica produzida por dois materiais reciclados pode ser utilizada para pavimentos asfálticos ajuda a mitigar impactos ambientais.

Palavras-chaves: Quartzito, pavimentação rodoviária, asfalto borracha, mistura asfáltica, Marshall.

ABSTRACT

The ornamental stone sector has contributed to environmental degradation and has been responsible for generating a large amount of waste. Another material with significant impact is the waste from tire rubber. The use of these alternative materials in asphalt mixtures aims to minimize damage to the environment. Aiming at the concept of sustainable development, this paper proposes the production of an asphalt coating using quartzite waste and an asphalt binder made of tire rubber as aggregate. The objective is to analyze the mechanical performance of the asphalt mixture when compared to other reference mixtures also composed of asphalt rubber. To this end, tests were performed to characterize the aggregate and the mixtures, according to the current standards of the National Department of Transport Infrastructure - DNIT that deal with asphalt mixtures. For aggregate characterization, only the Los Angeles Abrasion test and sand equivalent were not satisfactory. The manufacture of the specimens was done according to the Marshall methodology for dosing asphalt mixtures and after obtaining the volumetric parameters it was possible to determine the optimum content of the mixture studied. The mechanical characterization was carried out by means of tensile strength tests by diametrical compression (RT), modulus of resilience (MR), and determination of Marshall stability and creep. For all the tests above, the results were satisfactory. Therefore, the indication that the asphalt mixture produced by two recycled materials can be used for asphalt sidewalks helps to mitigate environmentally damaging impacts.

Keywords: quartzite, road paving, rubber asphalt, asphalt mixture, Marshall.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz de transportes brasileira (CNT, 2019)	4
Figura 2 – Malha rodoviária brasileira (adaptado de CNT, 2020)	5
Figura 3 – Estrutura de pavimentos flexíveis (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2008)	7
Figura 4 – Fluxograma das atividades realizadas por este trabalho (De autoria própria)	17
Figura 5 – Coleta do rejeito de quartzito foliado (arquivo pessoal)	18
Figura 6 – Análise granulométrica do quartzito (Silva e Viana, 2021).....	19
Figura 7 – Amostra de quartzito antes e depois da execução do ensaio de Abrasão Los Angeles (Silva e Viana, 2021)	19
Figura 9 – Material preenchido por água para a determinação da absorção do quartzito foliado (arquivo pessoal).....	20
Figura 10 – Ensaio para a determinação da massa hidrostática do quartzito (arquivo pessoal).....	20
Figura 11 – Execução do Ensaio de Massa Específica dos agregados miúdos através do frasco de Chapman (arquivo pessoal)	21
Figura 12 – Ensaio Equivalente de areia (Silva e Viana, 2021)	21
Figura 13 – Peneiramento do material com crivos de abertura circular e passagem pelos crivos redutores (arquivo pessoal).....	22
Figura 14 – Material antes e após a realização do ensaio (arquivo pessoal)	22
Figura 15 – Curva granulométrica – Faixa A (arquivo pessoal)	34
Figura 16 – Curva granulométrica – Faixa B (arquivo pessoal)	34
Figura 17 – Curva granulométrica – Faixa C (arquivo pessoal)	35
Figura 18 – Separação e estoque do agregado (arquivo pessoal)	24
Figura 19 – Separação da massa dos agregados para cada teor de ligante asfáltico (arquivo pessoal).....	27

Figura 20 – Corpos de prova após a compactação Marshall (arquivo pessoal) .28	
Figura 22 – Execução do ensaio RT (arquivo pessoal)31	
Figura 23 - Execução do Ensaio de Módulo de Resiliência (arquivo pessoal)....32	
Figura 24 – Execução do ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall (arquivo pessoal).....33	
Figura 25 – Curva granulométrica do rejeito de quartzito (De autoria própria) Erro! Indicador não definido.	
Figura 24 – Ensaio de adesividade (arquivo pessoal)38	
Figura 26 – a) Densidade x teor de ligante da mistura estudada b) Densidade x teor de ligante da mistura de referência (De autoria própria, adaptado de Michels e Arns, 2015).....40	
Figura 27 – a) Volume de vazios x teor de ligante da mistura estudada b) Volume de vazios x teor de ligante da mistura de referência (De autoria própria, adaptado de Michels e Arns, 2015).....41	
Figura 28 – a) Relação betume/vazios x teor de ligante da mistura estudada b) Relação betume/vazios x teor de ligante da mistura de referência (De autoria própria, adaptado de Michels e Arns, 2015).....42	
Figura 29 – RBV e Vv em função do teor de ligante (De autoria própria)43	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Extensão das rodovias brasileiras totais e pavimentadas por região geográfica (CNT, 2020).....	5
Tabela 2 – Especificações Técnicas do Ligante Asfáltico (Adaptado de Greca Asfaltos, 2022)	23
Tabela 3 - Composição Granulométrica para a mistura asfáltica (arquivo pessoal).....	35
Tabela 4 – Limites de Vv e RBV (DNIT-ES 031/2006).....	27
Tabela 5 - Relação existente entre a granulometria do solo e o coeficiente de uniformidade Cu e coeficiente de curvatura Cc (Adaptado de Caputo, 2007).....	Erro! Indicador não definido.
Tabela 6 – Resultado dos ensaios da massa específica, equivalente de areia e densidade e absorção do quartzito (De autoria própria, Neville, 2016).....	36
Tabela 7 – Resultado do ensaio de Abrasão Los Angeles (De autoria própria) .	36
Tabela 8 – Resultado do ensaio de perda ao choque (De autoria própria).....	37
Tabela 9 – Resultado do índice de forma das partículas de quartzito foliado (de autoria própria).....	37
Tabela 10 – Parâmetros volumétricos das Misturas Asfálticas (De autoria própria, adaptado de Michels e Arns, 2015).....	39
Tabela 11 – Resultado do ensaio de Resistência à Tração (De autoria própria, adaptado de Michels e Arns, 2015).....	43
Tabela 12 – Resultado do ensaio do Módulo de Resiliência (De autoria própria).....	44
Tabela 13 – Resultado da Estabilidade e Fluência Marshall (De autoria própria).....	45

LISTA DE SIGLAS

ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ACP	Ação Civil Pública
ANIP	Associação da Indústria de Pneumáticos
CA	Concreto asfalto
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CAUQ	Concreto asfáltico usinado à quente
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
Cc	Coeficiente de curvatura
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CP	Corpo de prova
Cu	Coeficiente de uniformidade
Da	Densidade aparente das misturas asfálticas
DER-MG	Departamento de Estradas e Rodagens de Minas Gerais
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
DMT	Densidade máxima teórica
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
LVDT	<i>Linear Variable Displacement Transducer</i>
MeDiNa	Método de Dimensionamento de Pneumáticos
MPMG	Ministério Público de Minas Gerais
MR	Módulo de resiliência
RBV	Relação betume/vazios
RT	Resistência à tração por compressão diametral

USACE	Corpo de Engenheiros Militares dos Estados Unidos
VAM	Vazios do agregado mineral
VCB	Vazios preenchidos com ligante asfáltico
Vv	Volume de vazios

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	2
1.1.1	Objetivos Específicos.....	3
1.2	Estrutura do Texto	3
2	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1	Situação atual das rodovias brasileiras	4
2.2	Pavimentos.....	6
2.3	Misturas Asfálticas.....	7
2.4	Desempenho dos pavimentos	8
2.5	Métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizados no Brasil.....	9
2.6	Geração de Pneus Inservíveis no Brasil.....	10
2.7	Borracha de Pneus em Misturas Asfálticas	11
2.7.1	Vantagens e desvantagens da utilização de borracha em misturas asfálticas	13
2.8	Rejeito de Quartzito em Misturas Asfálticas	14
2.9	Dosagem Marshall.....	15
3	Metodologia.....	17
3.1	Coleta do Quartzito.....	18
3.2	Caracterização do Quartzito foliado.....	19
3.2.1	Análise Granulométrica.....	19

3.2.2	Abrasão Los Angeles	19
3.2.3	Adesividade ao ligante betuminoso.....	20
3.2.4	Densidade e Absorção – Agregado Graúdo.....	20
3.2.5	Massa específica – Agregados miúdos.....	21
3.2.6	Equivalente de Areia	21
3.2.7	Índice de forma	22
3.2.8	Perda ao choque.....	22
3.3	Caracterização do ligante asfáltico	23
3.4	Metodologia Marshall para misturas asfálticas	23
3.4.1	Parâmetros Granulométricos	23
3.4.2	Granulometria dos agregados.....	23
3.4.3	Parâmetros volumétricos.....	24
3.5	Preparação dos corpos de prova.....	27
3.6	Teor de projeto	28
3.7	Ensaio Mecânicos com as misturas asfálticas.....	29
3.7.1	Resistência à tração por compressão diametral	29
3.7.2	Módulo de Resiliência.....	31
3.7.3	Estabilidade e fluência Marshall.....	32
4	Resultados	34
4.1	Caracterização do agregado	34
4.1.1	Granulometria	34
4.1.2	Massa específica, equivalente de areia e densidade e absorção ...	36
4.1.3	Abrasão Los Angeles	36
4.1.4	Perda ao choque.....	37

4.1.5	Índice de forma	37
4.1.6	Adesividade ao ligante betuminoso.....	38
4.2	Misturas asfálticas	38
4.2.1	Parâmetros Volumétricos	39
4.2.2	Teor de Projeto	42
4.3	Ensaio Mecânicos.....	43
4.3.1	Resistência à tração por compressão diametral	43
4.3.2	Módulo de Resiliência	44
4.3.3	Estabilidade e Fluência Marshall.....	45
5	Conclusão	46
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	47
	Referências.....	48

1 INTRODUÇÃO

A construção civil tem um alto consumo de matérias primas e fontes de recursos não renováveis, sendo um dos setores que provoca maior impacto ambiental devido ao elevado consumo de matéria prima. No setor das rochas ornamentais, o Brasil ocupa o quarto lugar mundial em exportação e a região sudeste 60% da extração de rochas no país. O estado de Minas Gerais é o segundo maior produtor de rochas ornamentais da região, onde os empreendimentos são predominantemente de pequeno porte (ABIROCHAS, 2018).

Segundo Pires (2007) o crescimento da indústria de beneficiamento de quartzito, a partir da década de 70, tem acelerado a degradação ambiental e gerado uma grande quantidade de rejeitos e outros materiais provenientes do processo de serragem e polimento da rocha. De forma a mitigar os danos ambientais, os rejeitos do quartzito podem ser transformados em agregados reciclados e utilizados em obras de pavimentação.

Os materiais alternativos para misturas asfálticas são benéficos em dois aspectos: o de caráter ambiental, uma vez que visa resolver a escassez de matérias primas comumente utilizadas para a pavimentação e de caráter econômico, uma vez que o material reciclável tem o valor mais baixo e sua utilização reduz os gastos municipais com despejos irregulares de rejeito (BIO, 2004; Leite *et al.*, 2007).

Outro material que tem um impacto ambiental significativo são os resíduos de borracha de pneus de veículos. Os pneus de automóveis são constituídos de borrachas naturais e sintéticas, aço, negro de fumo e tecidos, basicamente. A borracha natural fornece as propriedades elásticas e a borracha sintética proporciona a estabilidade térmica. Portanto são características importantes para que as borrachas de pneus sejam adequadas à reutilização. Dado isso, a adição de borracha de pneus em pavimentos é amplamente utilizada em diversos países, pois simultaneamente aos estudos de diversos métodos para melhoramento do asfalto, existe a preocupação com a sustentabilidade e desenvolvimento de materiais que possam minimizar prejuízos ao meio ambiente. O incentivo para a utilização de asfalto modificado com

borracha no Brasil foi promulgado com a resolução 258/99 pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) que entrou em vigor em 2002 e em seu artigo primeiro responsabiliza as empresas fabricantes e importadoras de pneumáticos a darem destinação final ambientalmente adequada.

A partir disso, novas leis foram criadas em vários estados do país. No estado de Minas Gerais, por exemplo, entrou em vigor em 14 de janeiro de 2010, a Lei Estadual nº 18.719/2010 que prevê a reciclagem dos pneus para produção de asfalto-borracha. Todavia, a legislação não tem sido cumprida pelo estado de Minas Gerais e o Departamento de Estradas e Rodagens – Minas Gerais (DER-MG), conforme Ação Civil Pública (ACP) ajuizada pelo Ministério Público de Minas Gerais. No estado, estima-se que anualmente são descartados 9 milhões de pneus, o que corresponde a 26 descartes diário (MPMG, 2016).

O Brasil necessita conhecer e empregar novas tecnologias para pavimentação rodoviária. Diante disso, os materiais alternativos e regionais e também, as borrachas de pneus, poderiam ser utilizados como incorporadores em misturas asfálticas para fins da pavimentação rodoviária. Destaca-se também, que estes materiais possam ser utilizados quando determinados experimentalmente suas características físicas, químicas e seu comportamento mecânico.

Assim, diante do crescimento da indústria de mineração de quartzitos e o alto descarte de pneus inservíveis este trabalho propõe a utilização de agregados alternativos em misturas asfálticas concomitante com um ligante constituído de borracha de pneus, para que assim, possa obter um revestimento que contribua para minimizar os danos ambientais.

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é analisar a incorporação de rejeitos de quartzito foliado como agregado mineral e asfalto borracha em misturas asfálticas utilizadas em pavimentos rodoviários flexíveis.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para que seja obtido o objetivo supramencionado, foram realizadas as seguintes etapas:

- a) Realizar uma caracterização geomecânica do rejeito de quartzito;
- b) Definir através da metodologia Marshall a dosagem ideal ser utilizada na mistura asfáltica;
- c) Avaliar os parâmetros encontrados para a mistura realizando uma comparação deste com a mistura padrão e analisando se a mesma possui aplicabilidade na pavimentação rodoviária.

1.2 Estrutura do Texto

O presente estudo foi estruturado em cinco capítulos. Neste capítulo 1 realizou-se uma breve apresentação sobre a importância da incorporação de rejeitos de quartzito foliado e a borracha de pneu para o meio ambiente e foi apresentado os objetivos deste trabalho.

O capítulo 2 constitui a revisão bibliográfica onde serão apresentados os principais elementos e conceitos a serem discutidos ao longo do trabalho.

O capítulo 3 aborda a metodologia utilizada na análise do tema. Foram caracterizados os materiais utilizados na mistura asfáltica e através da metodologia Marshall, identificado o teor de ligante ideal.

O capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos através da metodologia anterior.

Por fim, o capítulo 5 refere-se às conclusões obtidas durante a realização da análise.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Situação atual das rodovias brasileiras

A história do rodoviarismo no Brasil iniciou-se em 1861, com a inauguração da Estrada União Indústria, ligando o estado do Rio de Janeiro ao de Minas Gerais. Em 1940, as rodovias brasileiras pavimentadas eram de apenas 423 km, entre estaduais e federais. O decreto-lei nº 8.463/1945 concedeu autonomia técnica e financeira ao Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER e como consequência o crescimento da malha rodoviária brasileira (DNIT, 2006).

Entretanto, verifica-se que a qualidade da malha rodoviária brasileira não acompanhou o crescimento de sua demanda de utilização. No país, o modal rodoviário é o que possui o maior percentual de participação na matriz de transportes de acordo com a Figura 1, sendo responsável por 61% da movimentação de mercadorias e 95% de passageiros (CNT, 2021).

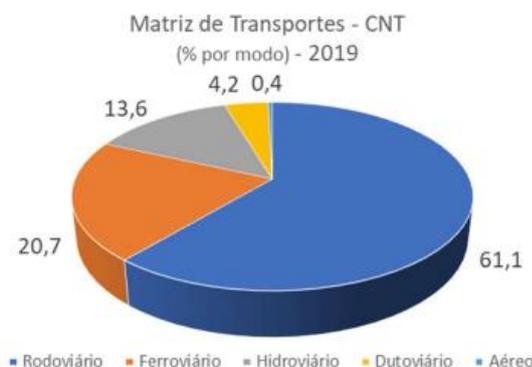


Figura 1 – Matriz de transportes brasileira (CNT, 2019)

A extensão total das rodovias no país é de 1.720.700 km, porém 12,4% ou 213.453 km desta totalidade é pavimentada conforme mostrado na Figura 2 (CNT, 2020). A malha rodoviária administrada por recursos públicos, modelo predominante, teve seu investimento reduzido no ano de 2020 em 2,3% em relação ao ano de 2019, afetando principalmente rodovias em construção. Já a malha concessionada os investimentos no ano de 2019 caíram 17,4% em comparação a 2018 (CNT, 2021). Com isso, observa-se que os bens produzidos no país podem ser competitivos no escoamento e distribuição da produção, contudo perdem a competitividade em

questão de infraestrutura de transportes, devido ao modal deficiente (BERNUCCI *et al.*, 2010).

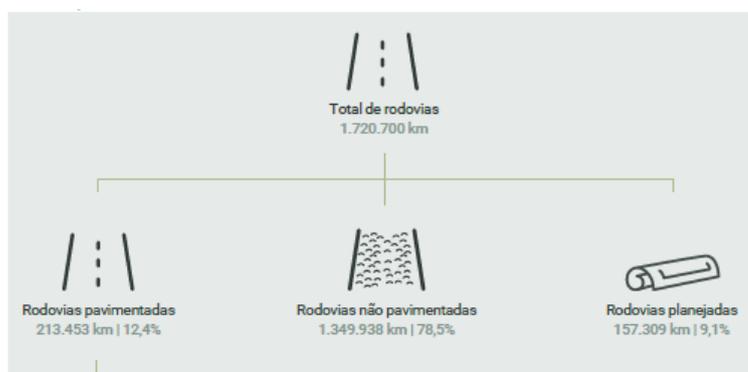


Figura 2 – Malha rodoviária brasileira (adaptado de CNT, 2020)

A região sudeste possui 533.795,6 km de rodovias sendo 62.520 km pavimentados conforme pode ser observado na Tabela 1. O estado de Minas Gerais possui em seu território mais da metade desta malha 280.355,2 km, ou seja, 52,52% e apenas 26.225 km com pavimento asfáltico. De acordo com a 21ª pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT), 69,8% das rodovias asfaltadas mineiras são classificadas como regulares, ruins ou péssimas. O estudo ainda estima que seriam necessários uma quantia aproximada de R\$ 9,2 bilhões para investimento em reconstrução e restauração de alguns trechos e manutenção em trechos desgastados (CNT, 2020).

REGIÃO	EXTENSÃO DAS RODOVIAS (KM)	
	TOTAL	PAVIMENTADAS
Brasil	1.720.700	213.453
Norte	148.028	22.389
Nordeste	445.403	59.961
Sudeste	553.795	62.520
Sul	338.079	38.323
Centro-Oeste	205.395	30.260

Tabela 1 – Extensão das rodovias brasileiras totais e pavimentadas por região geográfica (CNT, 2020)

Devido ao baixo investimento na matriz de transporte nacional, há uma deficiência no planejamento, na execução e na manutenção das rodovias. Grande parte das rodovias brasileiras foram construídas na década de 60 e com isso já foi ultrapassada a vida útil prevista em projeto (CNT, 2021). Faz-se necessário recuperar esses pavimentos com a reconstrução parcial ou total como o uso da pavimentação reciclada, por exemplo.

2.2 Pavimentos

O pavimento é uma estrutura construída sobre a terraplenagem e destina-se, técnica e economicamente, a resistir aos esforços horizontais e verticais oriundos do tráfego e distribuí-los às camadas subjacentes tornando a superfície de rolamento durável e assegurar aos usuários conforto, segurança e melhoria nas condições da pista (SENÇO, 2007).

Segundo Senço (2007), o pavimento é constituído de camadas finitas, tais como: subleito, o reforço do subleito, a sub-base e a base. Essa estrutura pode variar na espessura e nos materiais utilizados, porém deve atender às solicitações exercidas sobre elas. As camadas são divididas em:

- Subleito: camada de fundação do pavimento constituído por material natural consolidado ou por material de empréstimo compactado;
- Reforço do subleito: camada de espessura constante que fica sobre o subleito devidamente compactado e regularizado, com maiores características que as do subleito e menos que a camada da sub-base (DNIT, 2006);
- Base e sub-base: as camadas da base e sub-base são para aliviar as pressões sobre as camadas inferiores do pavimento. Quando a camada de base necessária para o desempenho das funções é muito espessa, por motivos econômicos, procura-se dividi-la em duas camadas criando a sub-base (BALBO, 2007).

Os pavimentos podem ser classificados de acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) como semirrígidos, rígidos e flexíveis. O pavimento semirrígido apresenta uma base cimentada com algum aglutinante sendo este com propriedades cimentícias. O pavimento rígido é aquele que o revestimento absorve as tensões do carregamento aplicado. Os pavimentos flexíveis apresentam camadas que sofrem deformações elásticas quando o carregamento é aplicado, distribuindo a carga em parcelas aproximadamente proporcionais entre as camadas (DNIT, 2006). A Figura 3 demonstra este tipo de pavimento.

Entre os três tipos de classificação dos pavimentos, o mais usual é o pavimento flexível que tem como exemplo típico a associação de brita (brita graduada, macadame) ou solo pedregulho com revestimento betuminoso. Logo, este tipo de revestimento é constituído por associação de agregados e materiais betuminosos, conhecido com mistura (DNIT, 2006).

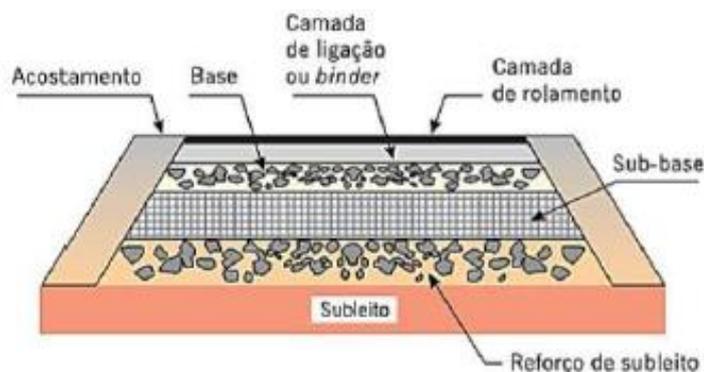


Figura 3 – Estrutura de pavimentos flexíveis (BERNUCCI *et al.*, 2008)

2.3 Misturas Asfálticas

No Brasil, o asfalto é conhecido como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e é definido como produto semissólido quando em temperaturas mais baixas, viscoelástico em temperatura ambiente e líquidos em altas temperaturas. Na pavimentação a utilização do CAP é uma das mais importantes por se tratar de um material aglomerante com forte união dos agregados e permite a flexibilidade

controlável, além de ser durável, impermeável e resiste à maioria dos ácidos, sais e álcalis podendo ser utilizado com ou sem aditivos (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Uma mistura asfáltica para pavimentação é definida como produto resultante da mistura de materiais granulares, de material de enchimento e do ligante asfáltico em proporções estabelecidas e adequadas ao fim que se destina (BERTOLLO, 2002).

Das misturas asfálticas mais conhecidas, tem-se o Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ) também conhecido como Concreto Asfáltico (CA) é uma das misturas asfálticas mais utilizadas no Brasil. Trata-se de um produto da combinação de agregados de diversas granulometrias e de cimento asfáltico. Esta mistura permite que o revestimento possa ser utilizado para qualquer volume de tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2010).

2.4 Desempenho dos pavimentos

O desempenho é a capacidade que o pavimento tem para atender suas funções com o uso ao passar do tempo. Segundo Haas *et al.* (2015), conhecer os mecanismos que regem os processos de deterioração de um pavimento é essencial para que sejam identificadas as causas que o levaram à condição atual.

O comportamento dos pavimentos está relacionado a vários aspectos como: o tipo e a escolha dos materiais, o dimensionamento, as técnicas construtivas, as cargas solicitantes, as práticas de manutenção e reabilitação. Através da avaliação dos pavimentos será possível verificar se há necessidade de manutenção, reconstrução e se atende as especificações das quais foi projetado (PÉREZ, 2016).

Há dois tipos de avaliação em estruturas de pavimentos: a avaliação funcional que é relativa ao desempenho do pavimento quanto a segurança e a qualidade ao rolamento do ponto de vista do usuário e a avaliação estrutural referente a qualidade do pavimento em suportar as cargas dos veículos sem que seja excedida a capacidade de suporte (PÉREZ, 2016).

Os dois principais defeitos presentes nas rodovias brasileiras, segundo Medina e Motta (2015) são as deformações por fadiga e a deformação permanente. Ambas

afetam a capacidade da pista de rolagem de uma rodovia tornando-a insegura. As deformações permanentes são caracterizadas principalmente por uma depressão na superfície do pavimento devido à ação repetida do fluxo de veículos (MOURA, 2010).

Já as deformações por fadiga são definidas pelo processo de mudança estrutural localizada, progressiva e permanente que ocorre em um ponto de material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um número de ciclos determinado (ASTM, 2013b). Quando no dimensionamento dos pavimentos é previsto uma elevada resistência à fadiga e reduzidas deformações permanentes, há um aumento da longevidade o que se justifica os estudos sobre materiais que garantam essas condições (MACHADO, 2013).

2.5 Métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizados no Brasil

De acordo com Balbo (2007), dimensionar um pavimento refere-se à determinação das espessuras das camadas a serem aplicadas e a composição dos materiais a serem empregados para que assim a estrutura tenha capacidade de suportar o carregamento imposto para um determinado volume de tráfego em situações climáticas do meio que está inserido.

O dimensionamento de um pavimento de modo geral é simples, porém, sua aplicação é complexa devido à dificuldade para estimativa de alguns fatores como: intervenção das ações climáticas, caracterização mecânica dos materiais das camadas estruturais do pavimento, comportamento mecânico dos materiais ao longo da vida útil, volume e magnitude do tráfego e o método de dimensionamento adequado às condições do país (FONTES, 2009).

O método de dimensionamento dos pavimentos flexíveis mais utilizado no Brasil é o método do DNER que utiliza como bases as curvas de dimensionamento do Corpo de Engenheiros Militares dos Estados Unidos (USACE) e no ensaio *California Bearing Ratio* (CBR) que avalia a resistência do material frente a deslocamentos significativos (MEDINA e MOTTA, 1997). O método de dimensionamento do DNER inclui-se nos

métodos empíricos, ou seja, na experiência adquirida e faz algumas correlações entre o desempenho do pavimento e algumas propriedades dos materiais que constituem a estrutura do pavimento (BEZERRA NETO, 2004).

Porém, está em transição o método de dimensionamento no país para o Método MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional. O método consiste em um programa computacional de dimensionamento de pavimentos flexíveis novos e reabilitados que analisa as tensões no pavimento por meio de correlações e da análise de múltiplas camadas. Após definir quais serão as espessuras das camadas e escolhidos os melhores materiais constituintes da estrutura são calculadas com o auxílio do *software* as tensões e deformações suportadas no pavimento (CHIARELLO, BARONI e PASCOAL, 2019).

2.6 Geração de Pneus Inservíveis no Brasil

Registros históricos apontam que os pneus foram inventados por Charles Goodyer em meados de 1845 após descoberta sobre o processo de vulcanização. Durante décadas várias experiências foram realizadas para o melhoramento das propriedades da borracha natural e com a Primeira Guerra Mundial foi criada na Alemanha uma nova tecnologia para a fabricação da borracha sintética, uma vez que neste período os pneus dependiam em sua totalidade da borracha natural como matéria-prima para sua confecção (RAMOS, 2005).

Os pneus são também compostos por variados componentes responsáveis pelo seu desempenho e finalidade como exemplo a qualidade e a segurança para suportar a rodagem por milhares de quilômetros nos mais variados tipos de pavimentos (AMORIM, 2015). De acordo com Lagarinhos (2011), o pneu pode ser definido como um artefato inflável, constituído basicamente por borracha e materiais de reforço, utilizado para a rodagem de veículos. Já o pneu inservível é todo aquele que após os processos de triagem e seleção, não é adequado para o processo de reforma que permita a condição de rodagem adicional.

O consumo de pneumáticos tem crescido juntamente com o decorrer da industrialização e por consequência, o acesso e a diversidade aos meios de locomoção. Embora o crescimento da frota automotora seja perceptível por toda a sociedade, as magnitudes do efeito ambiental causado pelos milhões de pneus inservíveis ainda não são consideradas (BERTOLLO, 2002).

Diante dos danos ambientais associados aos pneus, foi necessário a implantação de leis e diretrizes para a regulação dos pneumáticos inservíveis e a minimização de impactos. A coleta e a destinação dos pneumáticos inservíveis atendem aos objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, publicada pela Lei 12.305/2010. A lei obriga os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de pneus a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, através do retorno dos produtos pelo consumidor (AMORIM, 2015).

Anualmente são descartadas cerca de 450 mil toneladas de pneus que somados aos que já existem acumulado em todo o país, representa um grande passivo ambiental que necessita ser corretamente destinado para evitar danos diversos à saúde pública e ao meio ambiente (SEST SENAT, 2021). Segundo a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos – ANIP, a geração e acumulação de resíduos de pneus são um dos problemas ambientais mais graves no âmbito mundial. No Brasil no ano de 2020 foram produzidas 51,7 milhões de unidades de pneus, uma baixa de 12,9% em relação a 2019 devido a pandemia do Covid-19, porém no mesmo ano foram coletadas 380 mil toneladas de pneus, quantia equivalente a 42,2 milhões de unidades de carros de passeios (ANIP, 2021).

2.7 Borracha de Pneus em Misturas Asfálticas

Com o objetivo de melhorar a qualidade e a composição do asfalto, vários pesquisadores vêm buscando novas técnicas sendo a adição de borracha de pneu uma dessas técnicas. A inserção da borracha de pneus inservíveis, aqueles que atingiram toda sua vida útil, em ligantes asfálticos cujo o objetivo inicial era buscar materiais que apresentassem uma boa flexibilidade em temperatura ambiente, além de minimizar os problemas ambientais (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Com o intuito de reduzir os danos ambientais gerados por resíduos dos pneus, sua utilização em obras de pavimentação foi iniciada em 1960 quando notou-se que as propriedades elásticas da borracha contribuem para aumentar a resistência à deformação permanente e a durabilidade das misturas asfálticas convencionais (BERTOLLO, 2002).

Segundo Bertollo (2002) também nos anos de 1960 concomitantemente o asfalto-borracha, assim designado por conter pó extraído dos pneus, duas empresas suecas desenvolveram um método de adição de uma pequena quantidade de borracha triturada em substituição de parte dos agregados nas misturas asfálticas. Atualmente, as misturas para o asfalto com a incorporação de borracha de pneus são alcançadas por meio de metodologias que se destacam: o processo seco e úmido.

No processo úmido um teor de borracha mínimo de 15% em relação ao peso do ligante (ou 0,9% de borracha em relação à mistura) é previamente misturado ao ligante asfáltico antes de incorporar o agregado, modificando-o em uma liga química permanentemente, melhorando as propriedades do concreto asfáltico. Neste processo, ocorre a transferência mais efetiva das características de resistência e elasticidade ao envelhecimento para o ligante asfáltico original (SOARES e ASSIS, 2008).

No processo seco as partículas de borracha são misturadas aos agregados antes da adição do ligante asfáltico originando o produto conhecido como agregado-borracha. Geralmente, a borracha pode ser aplicada em proporção de 1 a 3% em peso do agregado total em misturas de granulometria do tipo *gap graded* (descontínua densa), *dense graded* (contínua densa) e *open graded* (descontínua aberta) (PRESTI, 2013). O processo seco é mais econômico comparado ao processo úmido, porém ainda existem dúvidas quanto à sua capacidade de aumentar a durabilidade do pavimento devido aos estudos que mostram que o processo úmido tem melhores resultados e a capacidade de aumentar em até dez vezes a durabilidade do pavimento (MACHADO, 2013).

2.7.1 Vantagens e desvantagens da utilização de borracha em misturas asfálticas

Segundo Cury *et al.*, tem-se como vantagens a utilização do asfalto-borracha:

- a) Redução da suscetibilidade térmica: quando a borracha é incorporada na mistura asfáltica a mistura é mais viscosa, portanto, mais resistente à climas quentes e apresenta maior ductilidade a baixas temperaturas.
- b) Redução do custo de manutenção: Rodovias com asfalto-borracha apresentam um tempo de manutenção reduzido quando comparado aos asfaltos convencionais.
- c) Redução de aparecimento de fissuras: por conta da flexibilidade, o asfalto-borracha resiste e reduz a quantidade de rachaduras e fissuras.
- d) Aumento da vida útil: a mistura com incorporação de borracha de pneu é resistente ao envelhecimento devido a adição de antioxidante e inibidores de raios ultravioleta.
- e) Redução de ruído: o asfalto-borracha mostra uma diminuição de 3 a 5 decibéis quando comparado ao asfalto tradicional.
- f) Melhoria da resistência à derrapagem: os veículos apresentam maior estabilidade no pavimento asfalto-borracha.
- g) Diminuição do descarte incorreto dos pneus: um quilômetro de pavimento emborrachado, com quatro linhas, pode ser usado de 2000 a 3000 pneus.

Apesar das vantagens apresentadas, Cury *et al.* (2002) e o DNIT (2006) descrevem algumas desvantagens, como:

- a) Aumento no custo de fabricação: o custo de fabricação no Brasil quando comparado aos Estados Unidos é maior devido ao alto custo de mão de obra. Além de ter um aumento do teor de asfalto das misturas modificadas quando comparada às misturas convencionais.
- b) Falta de investimento: apesar de leis nacionais e estaduais, ainda não há uma disseminação do uso de borracha de pneu no país para a pavimentação.

- c) Produção de ruídos durante a sua fabricação: segundo dados do DNIT de João Pessoa, o estado do Rio Grande do Sul suspendeu os investimentos na produção de asfalto-borracha devido aos ruídos provocados pelas usinas misturadoras quando fabricado em grande escala, porém, optou-se no estado pela utilização do asfalto-borracha em calçadas.

2.8 Rejeito de Quartzito em Misturas Asfálticas

Os quartzitos são formados por grãos de quartzo (finos) unidos fortemente, duros e compactados contendo fraturas e brilho semelhante ao quartzo. Os quartzitos podem conter além do quartzo outros minerais como mica e feldspato ou minerais provenientes da metamorfização. As cores não variam muito, por isso seu uso na construção civil é relativamente limitado. Os quartzitos têm como qualidades a alta resistência mecânica, ser antiderrapante, ter resistência ao aquecimento do sol e ter alta resistência à ação de produtos químicos (PIRES, 2007).

Estudos demonstram que a utilização de rejeitos e resíduos de quartzito como agregado alternativo em camadas de sub-base confere um ganho de plasticidade e de resistência na camada, sendo um material com potencial qualidade como agregado alternativo em substituição aos agregados pétreos normalmente utilizados (FERNANDES, 2019).

Porém, como quartzito é considerado uma rocha ácida, silicioso e apresenta-se como um agregado eletronegativo, portanto requer atenção quanto à adesividade ao ligante asfáltico, ou seja, de ser aderido ao material betuminoso devido à adsorção química. A adsorção ocorre quando a água entra em contato com a película do ligante asfáltico e a superfície do agregado descola ou separa, considerando-se assim, não recomendada para uso de misturas asfálticas (BERNUCCI *et al.*, 2008). Para solucionar a má adesividade usam-se fíleres ativos como pó calcário, cimento Portland, cal e até mesmo cinzas residuais de caldeiras ou aditivos que melhoram a adesividade (GENARO e NASCIMENTO, 2017).

2.9 Dosagem Marshall

A dosagem Marshall é o método de dosagem mais utilizado mundialmente e faz referência ao engenheiro Bruce Marshall que o desenvolveu na década de 1940 através da compactação por impacto. Todavia na década de 1980 rodovias dos Estados Unidos apresentaram deformações permanentes prematuras fazendo com que muitos engenheiros acreditassem que a compactação por impacto durante a dosagem produziu corpos-de-prova com densidades diferentes com as do pavimento em campo (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O método Marshall, com o passar dos anos foi modificado para se adaptar à realidade do aumento de carga e a pressão de enchimento dos pneus dos veículos. Dentro das modificações destaca-se a sugestão de novos critérios para a determinação de quantidade ótima de ligante asfáltico que deveria ser próxima dos valores correspondentes à densidade e à estabilidade aparente máximas. Houve a modificação também de outros parâmetros como porcentagem de vazios, relação de betume/vazios, fluência e estabilidade para que ficassem de acordo com a realidade mais atual (ZEGARRA, 2007).

Esse método é basicamente executado em três etapas: seleção dos agregados de acordo com a faixa granulométrica de projeto, seleção dos ligantes asfálticos utilizados na mistura e a determinação do teor de ligante asfáltico que é definido para que seja obtido um determinado volume de vazios na mistura para que possibilite a acomodação do ligante entre as partículas do agregado. Com um soquete de 4,5 kg são aplicados 75 golpes em cada face do corpo de prova que está relacionado a um revestimento que suportará a atuação de um tráfego com intensidade média a alta. Para estabelecer o teor de projeto são avaliadas as características volumétricas dos corpos de prova como:

- a) Massa específica aparente;
- b) Relação betume/vazios (RBV);
- c) Porcentagem de vazios;
- d) Vazios do agregado mineral.

E ainda, são avaliados parâmetros mecânicos como estabilidade Marshall que representa a resistência máxima à compressão radial e a fluência representando a deformação total desde a aplicação da carga nula até a carga máxima, resistência à tração por compressão diametral e o módulo de resiliência (BORGES, 2019).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentado a metodologia adotada a fim de promover o objetivo principal da pesquisa: a análise de misturas de quartzito foliado e asfalto borracha para pavimentos rodoviários. Para isso, foram necessárias etapas de revisão bibliográfica, coleta do material utilizado, caracterização geomecânica, caracterização dos ligantes e das misturas asfálticas. A Figura 4 apresenta de maneira esquemática o fluxograma proposto.

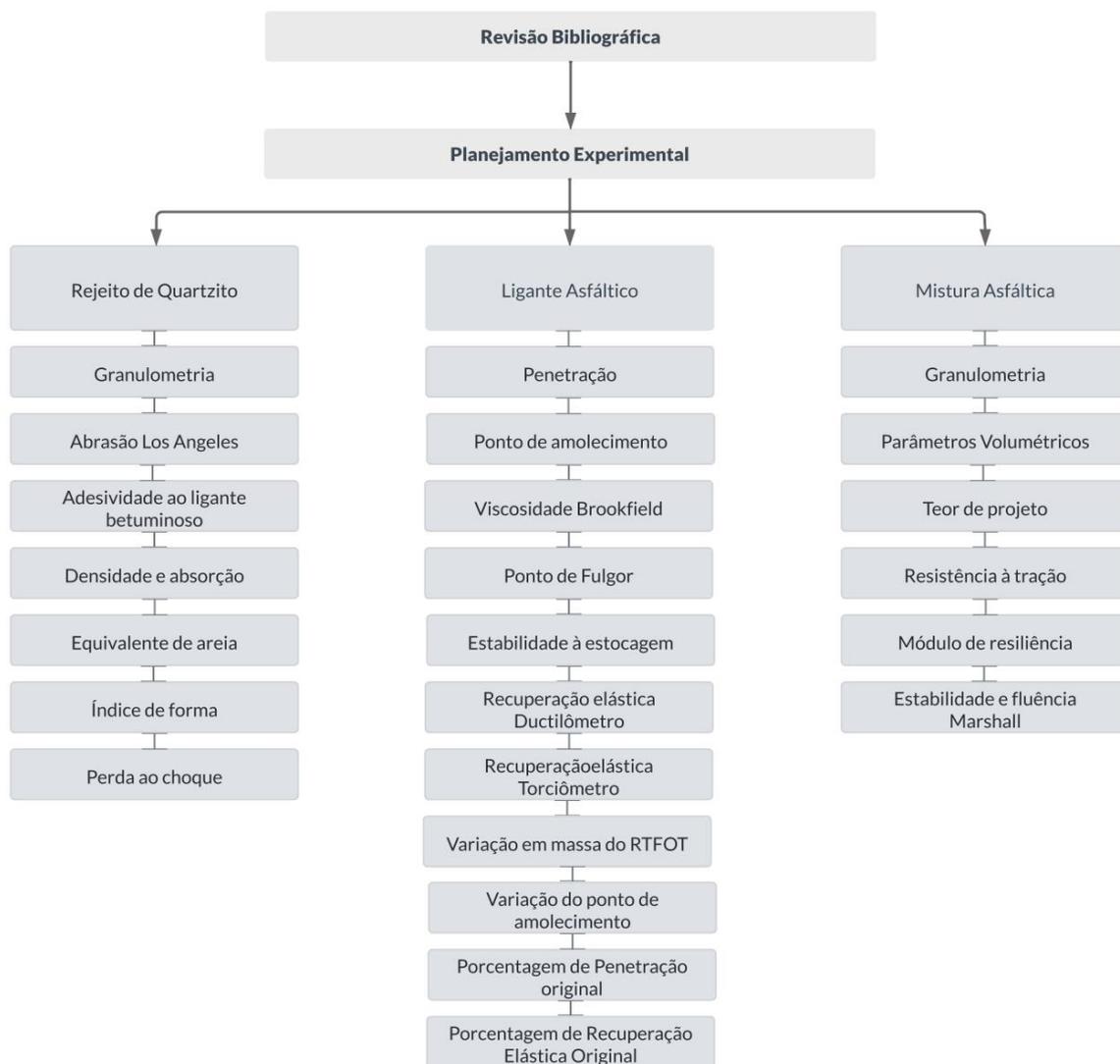


Figura 4 – Fluxograma das atividades realizadas por este trabalho (De autoria própria)

3.1 Coleta do Quartzito

A coleta do rejeito de quartzito foi realizada em uma pequena indústria de beneficiamento de rochas localizada em Passagem de Mariana, distrito pertencente à cidade de Mariana – MG. O material foi cedido pelo proprietário. A Figura 5 indica o local da coleta.



Figura 5 – Coleta do rejeito de quartzito foliado (arquivo pessoal)

3.2 Caracterização do Quartzito foliado

3.2.1 Análise Granulométrica

A amostra de rejeito de quartzito foliado foi submetida ao ensaio de análise granulométrica conforme o DNER-ME 083/98. A Figura 6 demonstra a execução do ensaio.



Figura 6 – Análise granulométrica do quartzito (Silva e Viana, 2021)

3.2.2 Abrasão Los Angeles

A abrasão Los Angeles foi obtida empregando os procedimentos de ensaio do DNER-ME 035/98. A Figura 7 ilustra a amostra antes e após a realização do ensaio.



Figura 7 – Amostra de quartzito antes e depois da execução do ensaio de Abrasão Los Angeles (Silva e Viana, 2021)

3.2.3 Adesividade ao ligante betuminoso

A verificação da adesividade ao ligante betuminoso foi realizada conforme a norma DNER-ME 078/94.

3.2.4 Densidade e Absorção – Agregado Graúdo

Para a determinação da densidade e da absorção dos agregados graúdos foi submetido o material conforme o DNER-ME 081/98. A realização do ensaio é demonstrada na Figura 8 e na Figura 9.



Figura 8 – Material preenchido por água para a determinação da absorção do quartzito foliado (arquivo pessoal)



Figura 9 – Ensaio para a determinação da massa hidrostática do quartzito (arquivo pessoal)

3.2.5 Massa específica – Agregados miúdos

Para que fosse determinada a massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman, o material foi submetido ao procedimento descrito na norma DNER-ME 194/98. A Figura 10 – Execução do Ensaio de Massa Específica dos agregados miúdos através do frasco de Chapman. A Figura 10 ilustra este ensaio.



Figura 10 – Execução do Ensaio de Massa Específica dos agregados miúdos através do frasco de Chapman (arquivo pessoal)

3.2.6 Equivalente de Areia

Para a determinação do equivalente de areia foi empregado a norma DNER-ME 054/97. A Figura 11 ilustra o ensaio.



Figura 11 – Ensaio Equivalente de areia (Silva e Viana, 2021)

3.2.7 Índice de forma

Para determinar o índice de forma das partículas de quartzito foi empregado o ensaio segundo a norma DNIT-ME 424/2020. A execução do ensaio é demonstrada pela Figura 12.



Figura 12 – Peneiramento do material com crivos de abertura circular e passagem pelos crivos redutores (arquivo pessoal)

3.2.8 Perda ao choque

A perda ao choque foi determinada conforme o método de ensaio DNER-ME 399/99. A Figura 13 ilustra este ensaio.



Figura 13 – Material antes e após a realização do ensaio (arquivo pessoal)

3.3 Caracterização do ligante asfáltico

Para a confecção das misturas asfálticas, o ligante escolhido era constituído de borracha de pneus inservíveis, conhecido como Asfalto Borracha. Os ensaios foram realizados pelo fabricante e os resultados estão detalhados na Tabela 2.

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	MÉTODO	LIMITE	RESULTADO
Penetração (25°C)	0,1 mm	NBR-6576	30 a 70	50
Ponto de Amolecimento, mín	°C	NBR-6560	55	57
- a 175°C, spindle 3, 20 rpm	cP	NBR-15529	800-2000	1850
Ponto de Fulgor, mín.	°C	NBR-11341	235	>240
Densidade relativa (25°C)		NBR-6296		1,02
Recuperação elástica	%	NLT-329	50	68,5

Tabela 2 – Especificações Técnicas do Ligante Asfáltico (Adaptado de Greca Asfaltos, 2022)

3.4 Metodologia Marshall para misturas asfálticas

3.4.1 Parâmetros Granulométricos

Para determinar em qual faixa granulométrica o quartzito foliado em sua forma natural pertence, foram traçados gráficos com os valores limites impostos pela norma DNIT-ME 031/2006.

3.4.2 Granulometria dos agregados

A dosagem das misturas asfálticas foi realizada conforme a norma DNER-ME 043/95 que descreve os procedimentos da metodologia Marshall. O objetivo de determinar a proporção entre o agregado e o ligante é conferir ao revestimento asfáltico um desempenho satisfatório de utilização (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2008). Portanto, para obter um controle granulométrico dos corpos de prova, o rejeito de quartzito foi peneirado e estocado separadamente, em recipientes, e identificados pelas peneiras especificadas pela norma DNIT-ME 031/2006 conforme a Figura 14.



Figura 14 – Separação e estoque do agregado (arquivo pessoal)

3.4.3 Parâmetros volumétricos

Para garantir um bom desempenho dos pavimentos, as propriedades volumétricas precisam ser definidas, portanto, deve-se determinar um teor de ligante asfáltico que satisfaça as especificações determinadas pelos órgãos rodoviários, referentes aos revestimentos asfálticos (SILVA, 2017). Os parâmetros a serem definidos, são:

a) Densidade máxima teórica (DMT): é a massa específica teórica das misturas asfálticas, cuja a formulação é definida pela Equação (1), sendo função das massas específicas reais da mistura asfáltica (ligante asfáltico e agregados) e à proporção que cada um dos componentes contribui na mistura total. Os valores de densidade real são previstos nas normas DNER-ME 084/95 e DNER-ME 081/98.

$$DMT = \frac{100}{\frac{P_1}{d_1} + \frac{P_2}{d_2} + \frac{P_3}{d_3} + \dots + \frac{P_n}{d_n}} \quad (1)$$

Onde:

P_1, P_2, P_3 e P_n : porcentagem de cada componente (agregado mais ligante asfáltico) em relação à massa total da mistura;

d_1, d_2, d_3 e d_n : densidade real dos materiais que compõem a mistura

b) Densidade aparente das misturas asfálticas (D_a): neste parâmetro, determina-se o peso seco do corpo de prova e em seguida mergulha-se o corpo de prova em água destilada por aproximadamente três minutos conforme a DNER-ME 117/94 e logo após, realiza-se a pesagem hidrostática. A Equação (2) demonstra como obter este parâmetro.

$$D_a = \frac{P_s}{P_s - P_i} \quad (2)$$

Onde:

P_s : peso seco do corpo de prova;

P_i : peso seco do corpo de prova;

c) Vazios preenchidos com ligante asfáltico (VCB): representa os espaços vazios entre os agregados preenchidos por ligante asfáltico (SILVA, 2017). A Equação ((3) demonstra como obter este parâmetro.

$$VCB = \frac{D_a \times P_{CAP}}{D_{CAP}} \quad (3)$$

Onde:

D_a : densidade aparente do corpo de prova;

P_{CAP} : porcentagem do ligante asfáltico na mistura;

D_{CAP} : densidade do ligante asfáltico;

- d) Vazios no agregado mineral (VAM): este parâmetro é definido como os espaços vazios entre as partículas do agregado (SILVA, 2017). A Equação (4) descreve como obter este parâmetro.

$$VAM = V_v + VCB \quad (4)$$

Onde:

V_v : Volume de vazios;

VCB : vazios preenchidos por ligante asfáltico

- e) Densidade relativa do CAP: este parâmetro foi estabelecido no valor de 1,030 g/cm³ conforme o fabricante.
- f) Volume de vazios (V_v): corresponde aos espaços vazios entre as partículas do agregado já recobertos pela película de asfalto (SILVA, 2017). A Equação (5) demonstra como obter este parâmetro.

$$V_v = \frac{DMT - D_a}{DMT} \times 100\% \quad (5)$$

Onde:

DMT : densidade máxima teórica;

D_a : densidade aparente do corpo de prova

- g) Relação betume-vazios (RBV): é definido pela porcentagem de vazios do agregado preenchido pelo ligante asfáltico (SILVA, 2017). A Equação (6) descreve como obter este parâmetro.

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \times 100\% \quad (6)$$

Onde:

VCB: vazios preenchidos por ligante asfáltico;

VAM: vazios no agregado mineral

A norma DNIT-ES 031/2006 ainda traz os limites de Vv e RBV para a camada de rolamento conforme apresentado na Tabela 3.

Parâmetros	Método de Ensaio	Limites para a camada de rolamento
Vv (%)	DNER-ME 043 (1995)	03-05
RBV (%)	DNER-ME 043 (1995)	75-82

Tabela 3 – Limites de Vv e RBV (DNIT-ES 031/2006)

3.5 Preparação dos corpos de prova

A confecção dos corpos de prova (CPs), foi dividida em três etapas: preparação das amostras, realização da mistura dos agregados com o ligante e compactação. Na preparação das amostras, os agregados são dosados, de acordo com a composição granulométrica apresentada na Tabela 4 e ilustrada na Figura 15. Em seguida, os agregados foram introduzidos na estufa, a uma temperatura entre 105°C e 110°C, com a finalidade de perderem toda a umidade. Na etapa seguinte os agregados foram colocados em recipientes aquecidos a 185°C onde eram introduzidos ao ligante com temperatura de 172 °C.



Figura 15 – Separação da massa dos agregados para cada teor de ligante asfáltico (arquivo pessoal)

A compactação por impacto foi realizada pelo compactador Marshall, onde foi aplicado 75 golpes por face do corpo de prova a uma temperatura de 170°C. Os corpos de prova eram produzidos em moldes cilíndricos que mediam aproximadamente 10 cm de diâmetro e, para que fossem submetidos aos ensaios mecânicos, deveriam ter uma altura de 6,22 cm a 6,48cm conforme o DNER-ME 043/95.

Foram moldados quatro corpos de prova para cada um dos seguintes teores de ligante: 5,5%, 6,0%, 6,5%, 7,0% e 7,5%. A Figura 16 ilustra os corpos de prova após a compactação Marshall.



Figura 16 – Corpos de prova após a compactação Marshall (arquivo pessoal)

3.6 Teor de projeto

A determinação do teor de projeto para um revestimento asfáltico é crucial para que seja garantida a durabilidade do pavimento e a segurança de tráfego. Um teor de projeto acima do valor ideal, irá reduzir o volume de vazios e conseqüentemente causando a exsudação e a instabilidade da mistura asfáltica. Um teor de projeto abaixo do valor ideal resulta no aumento de vazios, tornando o pavimento excessivamente permeável acelerando o processo de deterioração. Sendo assim, um pavimento confeccionado com o teor de projeto minimiza as patologias e conseqüentemente, aumenta sua vida útil (THOMAS, 2014).

O teor de projeto para misturas asfálticas constituída de rejeito de quartzito foliado e asfalto borracha foi definido segundo uma metodologia que consiste em determinar o teor em função dos parâmetros RBV e Vv (SOARES, FREITAS, *et al.*, 2000). Portanto, foi estimado um teor de ligante de asfalto borracha de 6,5% e em seguida definiu-se valores de teor abaixo e acima do valor pré-estabelecido, ou seja, os valores de ligante do asfalto borracha para a mistura foram 5,5%, 6,0%, 6,5%, 7,0% e 7,5%. Para cada teor, foram moldados quatro corpos de prova.

Dado isso, foram obtidos os valores médios de RBV e Vv para cada um dos valores de teor e gerado um gráfico destes dois parâmetros em função do teor de ligante. Destaca-se ainda no gráfico os limites de cada uma das variantes que foram apresentados na Tabela 3, com os respectivos teores de ligante, representados por X_1 , X_2 , X_3 , e X_4 .

A Figura 27 ilustra as curvas RBV e Vv das misturas com rejeito de quartzito foliado em função do teor de ligante constituído de asfalto borracha. As linhas em azul são referentes ao Vv e as linhas em vermelho representam o RBV. O teor ótimo é o valor compreendido entre a interseção das linhas de Vv e RBV, ou seja, entre X_3 e X_4 e dentro dos limites impostos pela Tabela 3.

3.7 Ensaios Mecânicos com as misturas asfálticas

Os ensaios a seguir foram realizados com os CPs constituídos de rejeito de quartzito e asfalto borracha confeccionados no teor de projeto. Estes ensaios visam analisar as respectivas propriedades mecânicas e também, a viabilidade do emprego em rodovias.

3.7.1 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração das misturas constituídas de rejeito de quartzito foliado e asfalto borracha foi avaliada conforme a norma DNIT-ME 136/2010. Neste ensaio o corpo de prova moldado no teor de projeto, é submetido a uma carga de compressão diametral causando um estado biaxial de tensões apresentando como resultado tensões de tração no centro do corpo de prova. O carregamento contínuo gera uma deformação vertical no corpo de prova até que ocorra a ruptura, em duas metades, segundo o plano diametral vertical.

Para realizar o ensaio, deve-se seguir as seguintes etapas:

- Medir a altura dos CPs em quatro posições diametralmente opostas. A altura será a média aritmética dessas quatro leituras;
- Obter o diâmetro do CP realizando novamente, quatro leituras em posições diametralmente opostas;
- Colocar o CP em câmara climatizada por um período de quatro horas sob temperatura de 25°C;
- Ajustar o corpo de prova na prensa hidráulica utilizando os frisos metálicos conforme a Figura 17;
- Aplicar a carga a uma velocidade constante até o momento da ruptura do CP;
- Anotar o valor da carga de ruptura (F) e calcular a resistência à tração por compressão diametral (RT) conforme a Equação (7).

$$RT = \frac{2 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (7)$$

Em que:

RT: resistência à tração por compressão diametral, em Mpa;

F: força de ruptura, em N;

D: diâmetro médio do CP, em cm;

H: altura média do CP, em cm.

De acordo com a normativa DNIT-ES 031/2006, o valor mínimo de RT para uma camada de rolamento é de 0,65 MPA. A Figura 17 ilustra este ensaio.



Figura 17 – Execução do ensaio RT (arquivo pessoal)

3.7.2 Módulo de Resiliência

O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNIT-ME 135/2010, utilizando-se como equipamento o SiCAEP. Segundo Silva (2017), o equipamento é um sistema de controle e aquisição de dados para ensaio de pavimentos em laboratório.

Para a realização do procedimento, foi medida a deformação elástica da amostra por um transdutor eletrônico do tipo LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*), posicionado na lateral do corpo de prova de forma a registrar as deformações no plano perpendicular à aplicação da carga conforme Figura 18.

O corpo de prova para o ensaio foi mantido por no mínimo quatro horas no interior de uma câmara de controle de temperatura, sob temperatura constante de 25°C.



Figura 18 - Execução do Ensaio de Módulo de Resiliência (arquivo pessoal)

Os resultados do módulo de resiliência, são obtidos automaticamente pelo programa do equipamento utilizado.

3.7.3 Estabilidade e fluência Marshall

A Estabilidade Marshall pode ser definida como a resistência máxima à compressão radial apresentada pelo corpo de prova. A unidade desta força máxima é dada em Newton (N). Já a fluência Marshall é definida como a deformação total

apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação da carga inicial nula até a aplicação máxima expressa em décimos de milímetros (SILVA, 2017).

Para o ensaio foi adotado os procedimentos conforme a norma DNER-ME 043/95 e os dois parâmetros são obtidos simultaneamente seguindo as seguintes etapas:

- Deixar os corpos de prova em estufa por um período de duas horas;
- Colocar os CPs no molde de compressão, conforme a Figura 19;
- Para obter o valor da estabilidade, deve-se aplicar a carga de compressão até o rompimento da amostra;
- Durante a aplicação da carga, deve-se inserir um medidor de fluência sobre um dos pinos do molde de compressão. O valor indicado no medidor representa a fluência do CP.

De acordo com DNIT-ES 031/2006, o valor mínimo da Estabilidade Marshall para uma camada de rolamento é de 500 kgf ou 5000N. A Figura 19 ilustra o procedimento.



Figura 19 – Execução do ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall (arquivo pessoal)

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização do agregado

4.1.1 Granulometria

Os gráficos das Figura 20, Figura 21 e Figura 22 foram traçados para verificar em que faixa de acordo com a norma DNIT-ME 031 o quartzito foliado em sua forma natural pertence.

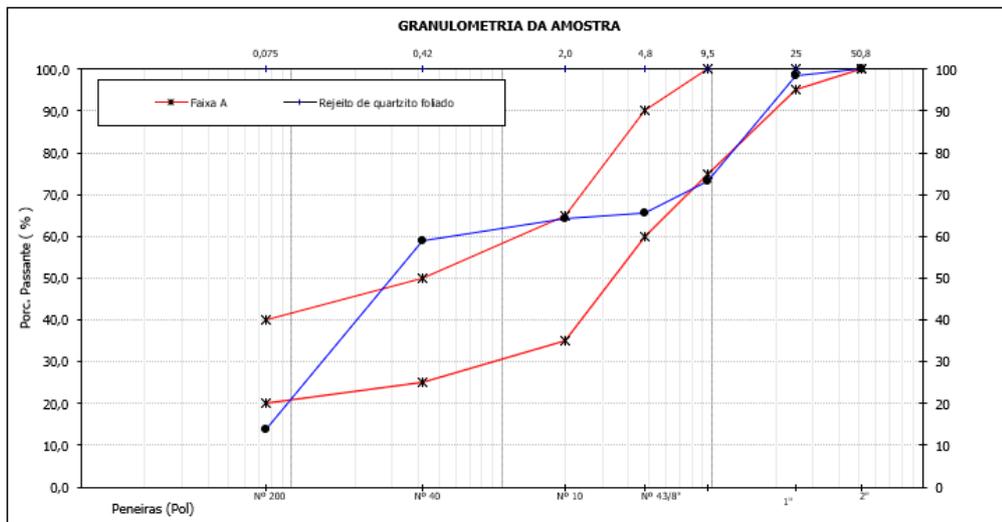


Figura 20 – Curva granulométrica – Faixa A (arquivo pessoal)

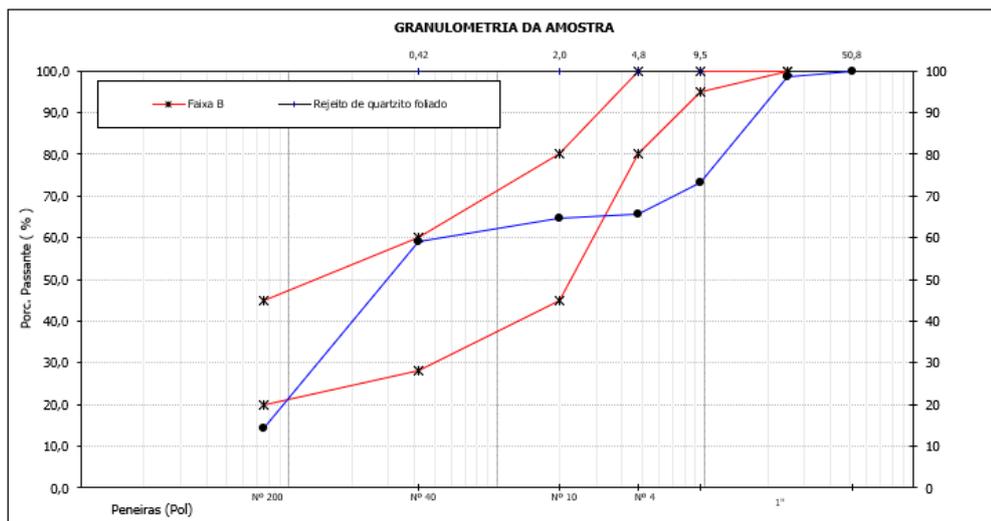


Figura 21 – Curva granulométrica – Faixa B (arquivo pessoal)

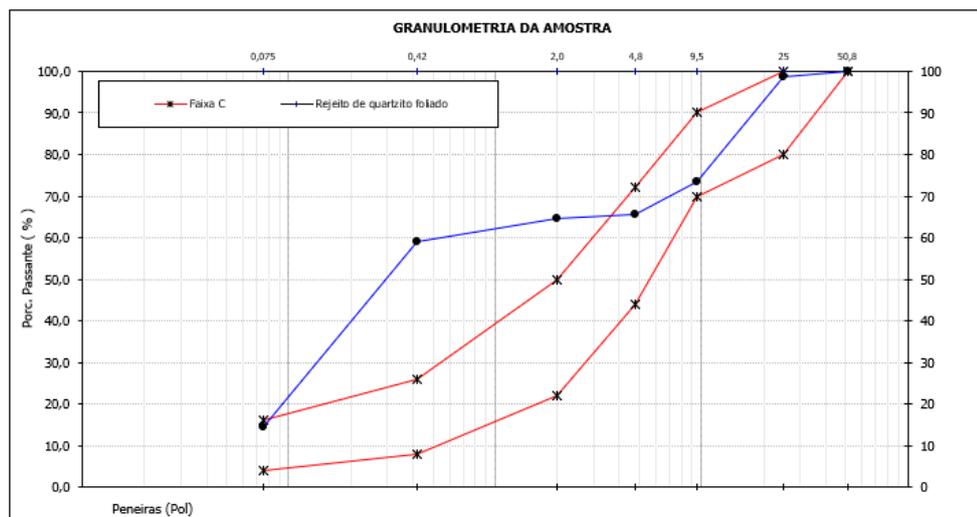


Figura 22 – Curva granulométrica – Faixa C (arquivo pessoal)

O material é bem distribuído granulometricamente, porém, o mesmo não se enquadra nos limites de nenhuma faixa para misturas betuminosas e por esse motivo, optou-se por enquadrar o rejeito de quartzito na faixa C da referida norma para o estudo em questão. A composição granulométrica é apresentada na Tabela 4.

PENEIRAS		FAIXA C DNIT		FAIXA DE PROJETO		
#	(mm)	Limite inferior	Limite superior	Média	% Passa	% Retido
3/4"	19,1	100	100	100	100	0
1/2"	12,7	80	100	90	90	10
3/8"	9,5	70	90	80	80	10
nº4	4,8	44	72	58	58	22
nº 10	2	22	50	36	36	22
nº 40	0,42	8	26	17	17	19
nº 80	0,18	4	16	10	10	7
nº 200	0,074	2	10	6	6	4
Fundo		0	0	0	0	6

Tabela 4 – Composição granulométrica para a mistura asfáltica (De autoria própria)

4.1.2 Massa específica, equivalente de areia e densidade e absorção

Os resultados da massa específica, equivalente de areia e densidade e absorção do quartzito estão dispostos na Tabela 5.

Amostra	Massa específica (g/cm ³)		Equivalente de areia (%)		Absorção
	Resultado	Pesquisas anteriores	Resultado	Mínimo normativo	Resultado
Rejeito de quartzito	2,54	2,62 (NEVILLE, 2016)	52	55	0,64

Tabela 5 – Resultado dos ensaios da massa específica, equivalente de areia e densidade e absorção do quartzito (De autoria própria)

Para massa específica, o resultado está apropriado com o valor determinado em pesquisa anterior, onde Neville (2016) apresenta a massa específica para rochas de diferentes grupos. Para o equivalente de areia, o agregado a ser utilizado em concreto asfáltico deve ter no mínimo 55% determinado em norma e o resultado apresentado está fora deste normativo. Já para absorção do quartzito, não foram encontrados valores em pesquisas anteriores.

4.1.3 Abrasão Los Angeles

A resistência à abrasão verifica a capacidade do agregado não se alterar quando é manuseado. Sendo assim, a partir do ensaio realizado foi possível determinar o desgaste superficial do quartzito quando submetido ao atrito. O resultado da abrasão Los Angeles é apresentado na Tabela 6.

Amostra	% De perda
Rejeito de Quartzito	96

Tabela 6 – Resultado do ensaio de Abrasão Los Angeles (De autoria própria)

De acordo com este resultado e com a norma DNIT 031/2006 o desgaste Los Angeles deve ser igual ou inferior a 50%, portanto, o rejeito de quartzito não é recomendado para como agregado para mistura asfáltica. A referida norma ainda cita que caso o agregado apresente um índice de abrasão superior a 50%, poderá ser utilizado o método do DNER-ME 401/99 para determinar a degradação da rocha após a compactação Marshall, ficando proposta para pesquisas futuras visando a utilização do material.

4.1.4 Perda ao choque

Entende-se como perda ao choque dos agregados a perda de massa das partículas após ser submetido a uma série de batidas. Este ensaio é executado com o aparelho Treton. A resistência ao choque é disposta na Tabela 7.

Amostra	Resistência ao choque (%)	Normativo
Rejeito de Quartzito	50	<60

Tabela 7 – Resultado do ensaio de perda ao choque (De autoria própria)

De acordo com este resultado e com Bernucci, Motta *et al* (2008) o agregado é recomendado para ser utilizado em misturas asfálticas.

4.1.5 Índice de forma

O resultado obtido da amostra de quartzito quanto ao índice de forma é demonstrado na Tabela 8.

Amostra	Tamanho diretriz da fração (mm)	Amostra retida no crivo 1 (%)	Amostra retida no crivo 2 (%)	Índice de forma
Quartzito	12,7	55,16	83,92	0,50
	9,5			

Tabela 8 – Resultado do índice de forma das partículas de quartzito foliado (de autoria própria)

O índice de forma das partículas varia de 0,0 a 1,0. Quanto mais próximo de 1,0 melhor a cubicidade do agregado. Para pavimentação o índice de forma mínimo deve ser 0,5, portanto, o agregado escolhido está dentro deste limite.

4.1.6 Adesividade ao ligante betuminoso

A adesividade do agregado ao ligante betuminoso é a propriedade que o agregado tem de ser aderido pelo material betuminoso. Conforme mostrado na Figura 23, não houve deslocamento da película betuminosa que recobre o agregado após a realização do ensaio, sendo assim, houve um resultado satisfatório.



Figura 23 – Ensaio de adesividade (arquivo pessoal)

4.2 Misturas asfálticas

A seguir, são apresentados os resultados para a mistura asfáltica constituída de rejeito de quartzito e asfalto borracha. Destaca-se que a principal proposta do estudo é a comparação dessa mistura com uma mistura asfáltica de referência também composta por asfalto borracha. A mistura adotada como referência é apresentada no trabalho de Michels e Arns (2015) onde os mesmos utilizaram asfalto borracha e rocha basáltica. Salienta-se que pelo fato de não haver ocorrência de rocha similar ao utilizada neste estudo não foi possível encontrar dados de referência utilizando a mesma rocha.

4.2.1 Parâmetros Volumétricos

Após a moldagem dos corpos de provas para os teores de ligantes de 5,5%, 6,0%, 6,5%, 7,0% e 7,5 pré-definidos, foram calculados os respectivos parâmetros volumétricos. A Tabela 9 dispõe os resultados da densidade aparente (Da), da densidade máxima teórica (DMT), do volume de vazios (Vv), dos vazios preenchidos com ligante asfáltico (VCB), dos vazios no agregado mineral (VAM) e da relação betume/vazios (RBV) obtidos através da média aritmética de quatro CPs de cada teor de ligante. Para a mistura de referência, não foram apresentados valores para DMT e para VCB. Salienta-se também, que os teores predefinidos por Michels e Arns (2015) foram de 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5% e 7,0%.

Mistura	Teor (%)	Da	DMT	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
Rejeito de quartzito	5,5	2,356	2,52	6,53	12,85	19,38	66,33
	6,0	2,382	2,501	4,75	14,18	18,93	74,98
	6,5	2,395	2,482	3,53	15,44	18,96	81,46
	7,0	2,368	2,464	3,87	16,44	20,31	80,97
	7,5	2,384	2,445	2,51	17,73	20,25	87,59
Rocha basáltica	5,0	2,537		6,43		18,87	65,93
	5,5	2,543		5,38		19,1	71,83
	6,0	2,530		5,07		19,95	74,68
	6,5	2,568		2,80		19,17	85,43
	7,0	2,553		2,56		20,08	87,43

Tabela 9 – Parâmetros volumétricos das Misturas Asfálticas (De autoria própria, adaptado de Michels e Arns, 2015)

Os resultados expostos indicam que a densidade aparente da mistura com rocha basáltica é maior quando comparada à mistura constituída por rejeito de quartzito foliado conforme apresentado na Tabela 9. Contudo, para os dois materiais, pode-se observar que os maiores valores de Da foram encontrados para os teores de 6,5% apresentado na Figura 24.

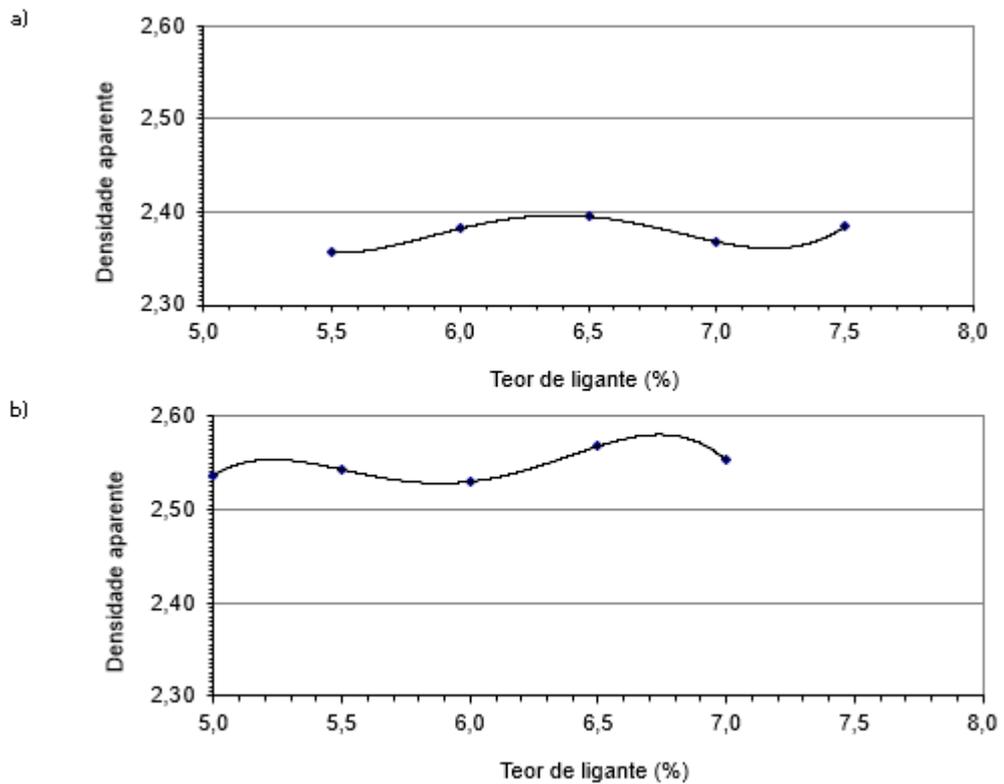


Figura 24 – a) Densidade x teor de ligante da mistura estudada b) Densidade x teor de ligante da mistura de referência (De autoria própria, adaptado de Michels e Arns, 2015)

Com relação ao volume de vazios, a mistura de referência apresentou apenas para o teor de 6,0% o valor de índice de vazios maior quando comparado com a mistura constituída de quartzito conforme a Tabela 9. Para todos os outros teores, a mistura de quartzito obteve volumes de vazios maiores. Observa-se também que aumentando o teor de ligante, o volume de vazios vai diminuindo. A Figura 25 apresenta os gráficos de volume de vazios em função do teor de ligante para a mistura estudada e para a mistura de referência.

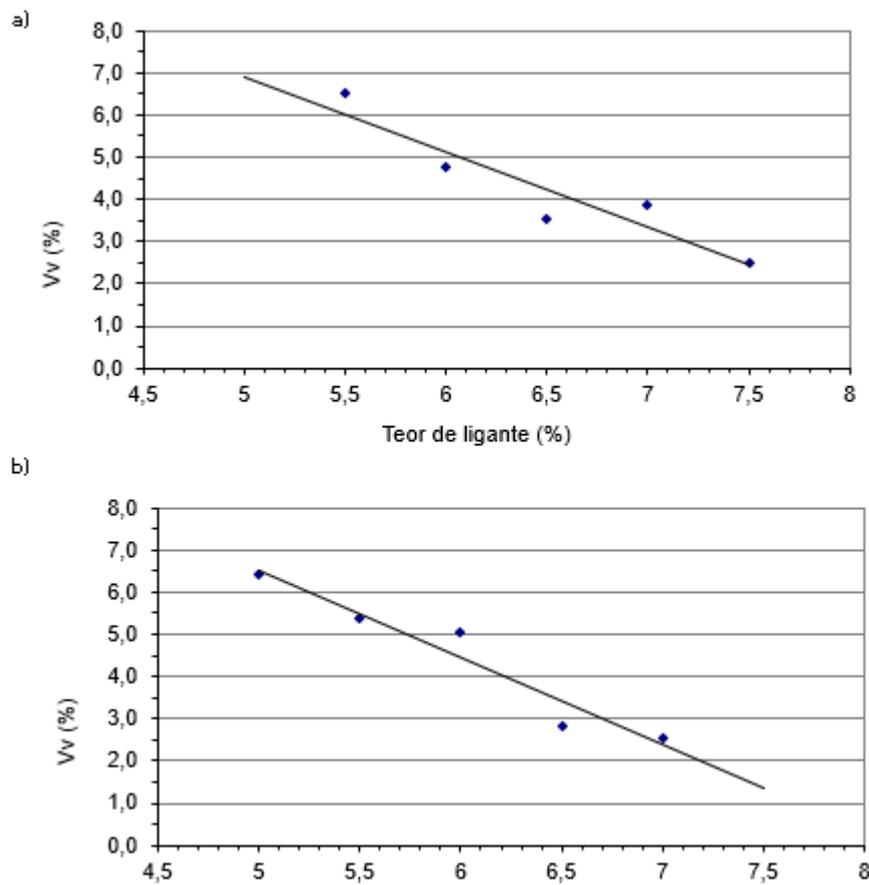
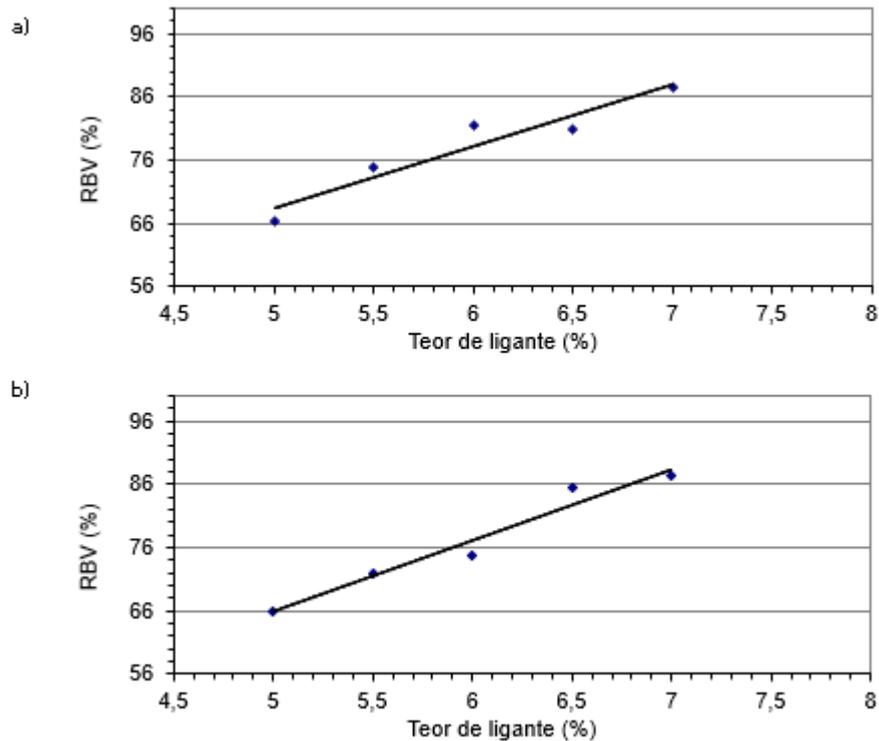


Figura 25 – a) Volume de vazios x teor de ligante da mistura estudada b) Volume de vazios x teor de ligante da mistura de referência (De autoria própria, adaptado de Michels e Arns, 2015)

Por fim, para os teores 5,5% e 7,0% a mistura de referência obteve um valor menor que a mistura constituída de rejeito de quartzito para o parâmetro VAM apresentado na Tabela 9. Para as demais, o rejeito de quartzito apresenta valores inferiores em comparação a rocha basáltica. Já o RBV, apenas o teor de 6,0% foi um pouco maior na mistura estudada quando comparado a mistura de rochas basálticas. Todos os demais parâmetros de RBV para a mistura de referência são superiores. Os valores de RBV aumentam proporcionalmente com o aumento do teor de ligante de acordo com a Figura 26.



**Figura 26 – a) Relação betume/vazios x teor de ligante da mistura estudada
b) Relação betume/vazios x teor de ligante da mistura de referência (De autoria própria, adaptado de Michels e Arns, 2015)**

4.2.2 Teor de Projeto

Conforme apresentado na Figura 27, o teor de projeto é encontrado através da intercessão das linhas de RBV e Vv em função do teor de ligante. Portanto, o teor de projeto para a mistura asfáltica constituída de quartzito foliado e ligante de borracha foi estabelecido em 6,82%. Para a mistura de referência Michels e Arns (2015) definiram o teor ótimo como 6,2%.

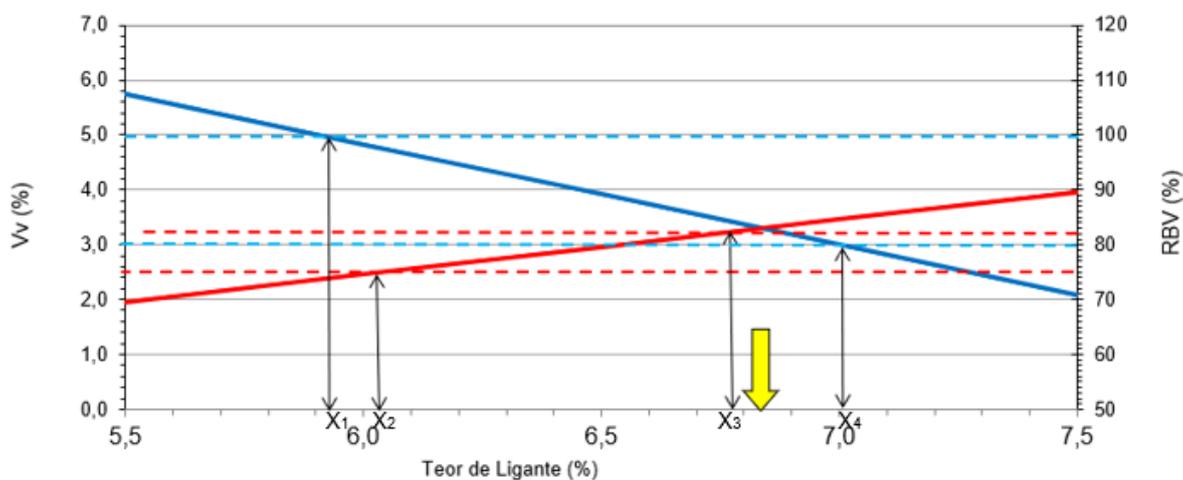


Figura 27 – RBV e Vv em função do teor de ligante (De autoria própria)

4.3 Ensaios Mecânicos

4.3.1 Resistência à tração por compressão diametral

A Tabela 10 apresenta os resultados da resistência à tração por compressão diametral (RT) para a mistura constituída por quartzito e para a mistura constituída de rocha basáltica, dosados no teor ótimo. O ensaio foi realizado com três CPs e o resultado apresentado é a média aritmética dos resultados individuais dos corpos de prova.

Mistura	Teor ótimo (%)	RT (MPa)	Normativo
Rejeito de quartzito	6,82	0,82	0,65
Rocha basáltica	6,20	0,60	

Tabela 10 – Resultado do ensaio de Resistência à Tração (De autoria própria, adaptado de Michels e Arns, 2015)

De acordo com o resultado, a mistura constituída por rocha basáltica, apresenta um valor inferior à da mistura estudada e a 0,65 Mpa especificado como valor mínimo pelo DNIT-ES 031/2006 para revestimentos. Pode-se dizer ainda que a utilização do

rejeito de quartzito acarretou em um aumento de resistência à tração de 36,35% quando comparado com o agregado basáltico.

4.3.2 Módulo de Resiliência

Para obter o módulo de resiliência (MR), as grandezas tais como a temperatura do ensaio, tipo de agregado e o teor de ligante devem ser consideradas (SILVA, 2017). A Tabela 11 fornece o resultado do módulo de resiliência e a relação MR/RT encontrada. Para a mistura de referência, não foram apresentados os resultados para o ensaio.

Mistura	Teor ótimo	MR (MPa)	MR/RT
Rejeito de quartzito	6,82	4752,00	5795,12

Tabela 11 – Resultado do ensaio do Módulo de Resiliência (De autoria própria)

Bernucci, Motta *et al* (2008) fornecem alguns resultados de módulos de resiliência para misturas investigadas no Brasil a 25°C. Portanto, dando continuidade a principal proposta deste trabalho que é a comparação, foram obtidos os valores de 2393 MPa para o MR e 4786 a relação de MR/RT para o asfalto borracha pelo processo úmido pertencente a faixa C.

Dado isso, com os resultados apresentados pode-se concluir que o módulo de resiliência da mistura asfáltica constituída por rejeito de quartzito é superior ao apresentado no livro. Esse resultado pode ser explicado por Medina e Motta (2015), onde dizem que a resiliência é influenciada pela granulometria dos agregados e pelo tipo de ligante, sendo assim, a diferença dos valores encontrados deve-se a características diferentes entre os materiais.

A relação entre o módulo de resiliência e resistência à tração (MR/RT) é o parâmetro indicador da vida de fadiga de misturas pois agrega informações de resistência e rigidez (SILVA, 2017). É recomendado que esta relação apresente um valor da ordem de 3000 para que a mistura apresente um comportamento satisfatório à fadiga, apresentando um bom desempenho estrutural, com boa resistência à tração

e flexível (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2008). Ambas as misturas apresentam valores de MR/RT maiores que o recomendado e com valores bem próximos.

4.3.3 Estabilidade e Fluência Marshall

A Tabela 12 apresenta os resultados de Estabilidade e Fluência Marshall. A mistura estudada apresenta valores acima de 5000 N, limite mínimo recomendado pelo DNIT-ES 031/2006 para a estabilidade de pavimentos asfálticos.

Mistura	Estabilidade (N)	Normativo (N)	Fluência (mm)
Rejeito de quartzito	23878	5000	10

Tabela 12 – Resultado da Estabilidade e Fluência Marshall (De autoria própria)

Pode-se observar também que a mistura constituída por rejeito de quartzito, apresentou uma fluência elevada em razão da característica de recuperação elástica devido a presença da borracha.

5 CONCLUSÃO

Serão apresentados neste capítulo as principais conclusões obtidas o desempenho de misturas asfálticas constituídas de rejeito de quartzito foliado e asfalto borracha para uso em pavimentos rodoviários. Com base nas conclusões, procura-se sugerir estudos para trabalhos futuros que complementam esta pesquisa.

A caracterização do agregado permitiu observar que o rejeito de quartzito foliado atende aos valores recomendados em norma, exceto o resultado do equivalente de areia e a abrasão Los Angeles que não atenderam ao valor proposto. Contudo para Abrasão Los Angeles, há um ensaio complementar para assegurar que o agregado poderá ser utilizado em misturas asfálticas quando o valor obtido pelo no ensaio de abrasão não foi satisfatório. Saraiva (2006) menciona que um material alternativo poderá ser utilizado como revestimento desde que assegure um desempenho estrutural mesmo não enquadrando em todas as condicionantes normativas. Portanto, apesar de alguns parâmetros não apresentarem resultados satisfatórios, a mistura não pode ser inviabilizada.

Após a definição do teor ótimo e realizado os ensaios mecânicos, a mistura constituída por asfalto borracha e rejeito de quartzito tem uma resistência à tração superior à mistura de referência e ao valor normativo. Quanto ao módulo de resiliência, este também apresenta valores superiores aos encontrados pela mistura de referência. Para a estabilidade e fluência Marshall pode ser um indicativo que com os resultados obtidos a mistura asfáltica possui capacidade de suportar carregamentos sem sofrer grandes deformações plásticas permanentes devido a característica elástica presente na borracha. Dado isso, com base nas análises laboratoriais o rejeito de quartzito tem potencial para ser empregado concomitantemente ao asfalto borracha.

Este estudo também demonstra que diferentes materiais, como o rejeito de quartzito e a borracha de pneus inservíveis, podem ser aproveitados em diversos âmbitos da sociedade e em especial para pavimentos rodoviários. Portanto, pesquisas sobre a aplicabilidade desses materiais devem ser fomentadas, principalmente em um país com uma malha rodoviária extensa e com peculiaridades de cada região.

Ressalta-se ainda que a utilização desses materiais contribui para a redução de danos ambientais e redução do consumo dos agregados convencionais na pavimentação auxiliando em um mundo mais sustentável.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A partir do estudo desenvolvido nesta pesquisa, é possível apresentar algumas sugestões para trabalhos futuros, tais como:

- Executar e monitorar um trecho experimental com a mistura estudada em uma via de tráfego de automóveis nas cidades de Ouro Preto e/ou Mariana ou em outras regiões de extração e deposição do rejeito;
- Realizar um estudo específico para inclusão da mistura no banco de dados do Método MeDiNa;
- Analisar o rejeito de quartzito quando utilizado com outros materiais, como solo laterítico, rejeito de minério de ferro, para sub-base e base de pavimentos;
- Realizar novos estudos de misturas asfálticas com substituição do agregado convencional por outros tipos de materiais considerados rejeitos.

REFERÊNCIAS

ABIROCHAS. **O setor brasileiro de rochas ornamentais**. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. São Paulo. 2018.

AMORIM, E. S. Dissertação (mestrado). **Logística Reversa de Pneus Inservíveis: uma pesquisa-ação no município de Três Corações (MG)**, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá 2015.

ANIP. Indústria Nacional de Pneumáticos coletou mais de 80 mil toneladas de pneus inservíveis no Estado de São Paulo em 2020. **Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos**, 2021. Disponível em: <<https://www.anip.org.br/releases/industria-nacional-de-pneumaticos-coletou-mais-de-80-mil-toneladas-de-pneus-inserviveis-no-estado-de-sao-paulo-em-2020/>>. Acesso em: 24 agosto 2021.

ASTM, E. 1.-3. **Standard terminology relating to fatigue and fracture testing**. Usa: American Society of Testing and Materials: [s.n.]. 2013b.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica - formação básica para engenheiros**. 1. ed. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2008.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS - Petróleo Brasileiro, v. 3, 2010.

BERTOLLO, S. M. Tese (Doutorado). **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus.**, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos 2002.

BEZERRA NETO, R. S. Dissertação (mestrado). **Análise Comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empíricos do DNER e mecanístico e proposta em um catalogo simplificado de pavimentos para a região de campo Grande (MS)**, Escola de Engenharia São Carlos USP, São Carlos 2004.

BIO. Resíduos da construção civil. **Revista Brasileira de Saneamento e meio Ambiente**, Brasília, p. 14-17, Outubro/Dezembro 2004.

BORGES, P. R. Tese (Doutorado). **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente analisadas pelos métodos de dosagem Marshall e Superpave**, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa 2019.

BRASIL. Lei Nº 12305 de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações (fundamentos)**. 6ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2007.

CHIARELLO, G. P.; BARONI, M.; PASCOAL, P. T. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte ANPET. **Avaliação estrutural e financeira de pavimento flexível dimensionado pelo método do DNER (1981) e MeDiNa (2019): Estudo de caso da duplicação da BR 287 - Trecho Santa Cruz do Sul à Tabaí/RS**, Balneário Camboriú, 2019. 1-12.

CNT. Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram? **Confederação Nacional do Transporte**, 2017. Disponível em: <<https://cnt.org.br/agencia-cnt/cnt-divulga-estudo-por-que-pavimento-rodovias-brasil-nao-duram-resultados>>. Acesso em: 02 agosto 2021.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Anuário CNT do transporte**, 2020.

CNT. Agência CNT Transporte Atual. **Confederação Nacional do Transporte**, 2021. Disponível em: <<https://cnt.org.br/agencia-cnt/investimento-transporte-vem-caindo>>. Acesso em: 02 agosto 2021.

COSTA, B. R. Trabalho de conclusão de curso (graduação). **Avaliação da implantação do dimensionamento de pavimentos flexíveis pelo método MeDiNa no contexto brasileiro**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2021.

CURY, M. V. Q. et al. Simpósio Brasileiro sobre Estradas e a Interface Ambiental.. **Análise socioeconômica e ambiental para o uso de asfalto emborrachado na construção de rodovias**, Foz do Iguaçu, 2002. 1-12.

- DNER-ME 035. **Determinação da abrasão Los Angeles**. Rio de Janeiro. 1998.
- DNER-ME 043. **Misturas betuminosas a quente - Ensaio Marshall**. Rio de Janeiro. 1995.
- DNER-ME 054. **Equivalente de areia**. Rio de Janeiro. 1997.
- DNER-ME 078. **Agregado graúdo - Determinação da adesividade ao ligante betuminoso**. Rio de Janeiro. 1994.
- DNER-ME 081. **Determinação da densidade e da absorção dos agregados graúdos**. Rio de Janeiro. 1998.
- DNER-ME 083. **Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro. 1998.
- DNER-ME 084. **Determinação da densidade real do agregado miúdo**. Rio de Janeiro. 1995.
- DNER-ME 117. **Mistura Betuminosa - Determinação da densidade aparente**. Rio de Janeiro. 1994.
- DNER-ME 194. **Determinação da densidade e da absorção dos agregados graúdos**. Rio de Janeiro. 1998.
- DNER-ME 399. **Determinação da perda ao choque no aparelho Treton**. Rio de Janeiro. 1999.
- DNIT. **Histórico Do Rodoviarismo**, 2006. Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/historico/#Breve%20hist%C3%B3rico%20do%20rodoviarismo%20federal%20no%20Brasil>>. Acesso em: 02 agosto 2021.
- DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006.
- DNIT. DNIT inicia procedimentos para transição do método de dimensionamento de pavimentos. **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/noticias/dnit-inicia-procedimentos-para-transicao-do-metodo-de-dimensionamento-de-pavimentos>>. Acesso em: 08 agosto 2021.

DNIT- ME 424. **Determinação do índice de forma.** Brasília. 2020.

DNIT-136. **Pavimentação Asfáltica- Misturas Asfálticas- Determinação do módulo de resiliência.** Rio de Janeiro. 2010.

DNIT-ES 031. **Pavimentos flexíveis- Concreto asfáltico- Especificações de serviço.** Rio de Janeiro. 2006.

DNIT-ME 135. **Determinação da resistência a tração por compressão diametral.** Rio de Janeiro. 2010.

FERNANDES, H. C. L. Utilização de resíduos de quartzito na construção rodoviária. Belo Horizonte: Poisson, v. 7, 2019. p. 39-46.

FONTES, L. P. T. D. L. Tese (Doutorado). **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos,** Universidade do Minho, Minho 2009.

FRANCO, F. A. P.; MOTTA, L. M. G. Manual para utilização do Método Mecanístico-Empírico MeDiNa: Apresentação dos programas. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos,** Rio de Janeiro, 2020. 78.

GENARO, C. F.; NASCIMENTO, M. S. Trabalho de Conclusão de Curso. **Análise e melhoramento da adesividade do agregado granítico ao ligante betuminoso em misturas asfálticas,** Universidade Tecnológica do Paraná, Ponta Grossa 2017.

HAAS, R.; HUDSON, W. R.; FALLS, L. C. **Pavement Asset Management.** Massachusetts. 2015.

LAGARINHOS, C. A. F. Tese (doutorado). **Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa,** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo 2011.

LEITE, F. et al. **Efeitos da compactação nas propriedades físicas e mecânicas de agregados reciclados de resíduo sódio na construção civil.** 38ª Reunião Anual de Pavimentação. Manaus. 2007.

MACHADO, A. F. Dissertação (Mestrado). **Análise da interação betume borracha em misturas betuminosas com borracha reciclada de pneus pelo processo seco**, Universidade do Minho, Guimarães 2013.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 2015.

MELO, L. S. C. **Caracterização de compostos de cimento Portland confeccionados com resíduos do processamento a úmido de rochas ornamentais de origens distintas**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2016.

MICHELS, M. P.; ARNS, P. **Análise de misturas asfálticas realizadas com ligante asfáltico convencional e com o modificado com borracha aplicando o método Marshall**. Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma. 2015.

MOURA, E. D. Estudo da deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista de laboratório. **Tese (Doutorado)**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo USP, São Paulo 2010.

MPMG. Ministério Público de Minas Gerais. **Liminar determina que DER-MG e estado de Minas Gerais utilizem asfalto produzido com pneus na construção e recuperação das vias públicas**, 2016. Disponível em: <<https://www.mpmg.mp.br/comunicacao/noticias/liminar-determina-que-der-mg-e-estado-de-minas-gerais-utilizem-asfalto-produzido-com-pneus-na-construcao-e-recuperacao-das-vias-publicas.htm>>. Acesso em: 28 julho 2021.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PÉREZ, J. S. L. Dissertação (Mestrado). **Avaliação do desempenho de pavimentos flexíveis dos segmentos monitorados de Urubici e Itapoá**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2016.

PIRES, P. R. Dissertação (Mestrado). **Caracterização sócio-econômico e ambiental da atividade do tratamento de Quarzito na região de Ouro Preto**, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto 2007.

PITANGUI, L. C. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação). **Análise comparativa do método do DNER com o método mecanístico-empírico MeDiNa**, Universidade de Brasília, Brasília 2019.

RAMOS, L. S. N. Dissertação (mestrado). **A logística Reversa de Pneus Inservíveis**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2005.

SARAIVA, S. L. C. Tese (Mestrado). **Metodologia e Análise Experimental do Comportamento Geotécnico da Estrutura de Pavimentos Rodoviários**, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto 2006.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2. ed. São Paulo: PINI, v. 1, 2007.

SEST SENAT. Serviço Social do Transporte Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte. **Cerca de 450 mil toneladas de pneus são descartados por ano no Brasil**, 2021. Disponível em: <<https://www.sestsenat.org.br/imprensa/noticia/cerca-de-450-mil-toneladas-de-pneus-sao-descartados-por-ano-no-brasil>>. Acesso em: 28 agosto 2021.

SILVA, M. G. B.; VIANA, I. N. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro e de resíduo de quartzito foliado como matérias primas para construção de infraestrutura rodoviária**. Ouro Preto: [s.n.]. 2021.

SILVA, R. G. O. D. **Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto , p. 270. 2017.

SOARES, A.; ASSIS, M. **O uso da borracha de pneus na pavimentação como alternativa ecologicamente viável**, Universidade Católica de Salvador, Salvador 2008. 15.

SOARES, J. B. et al. **Método de previsão do teor ótimo de ligante em misturas asfálticas tipo CBUQ**. 32ª Reunião anual de Pavimentação. Brasília: [s.n.]. 2000. p. 148-160.

SUL, A. L. **Avaliação de Métodos de Dosagem de Misturas Asfálticas e Sua Relação com as Propriedades Mecânicas**. Agência Nacional de Transportes Terrestres. [S.l.], p. 210. 2014.

THOMAS, T. **Comparação do teor de ligante de projeto determinado pela DMT e DMM de diferentes misturas asfálticas**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 77. 2014.

ZEGARRA, J. R. E. Dissertação (mestrado). **Avaliação de misturas produzidas com ligantes asfálticos peruanos convencionais PEN 60/70 e modificados por polímero SBS tipo I 60/60 e PG 76-22**, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos 2007.