



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Filipe Andrade Lima Pimentel

**COMPORTAMENTO DE UMA MISTURA ASFÁLTICA MODIFICADA PELA
ADIÇÃO DE FIBRAS SINTÉTICAS**

Palmas, TO

2021

Filipe Andrade Lima Pimentel

**COMPORTAMENTO DE UMA MISTURA ASFÁLTICA MODIFICADA PELA
ADIÇÃO DE FIBRAS SINTÉTICAS**

Projeto de pesquisa apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Prof. Dr. Marcus Vinicius Ribeiro e Souza.

**Palmas, TO
2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

P644c Pimentel, Filipe.
COMPORTAMENTO DE UMA MISTURA ASFÁLTICA
MODIFICADA PELA ADIÇÃO DE FIBRAS SINTÉTICAS. / Filipe
Pimentel. – Palmas, TO, 2021.
80 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins –
Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Civil, 2021.

Orientador: Marcus Vinicius Ribeiro e Souza
Coorientador: Bruno Carrilho de Castro

1. Fibras. 2. Mistura Asfáltica. 3. Polipropileno. 4. Aramida. I.
Título

CDD 624

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizada desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

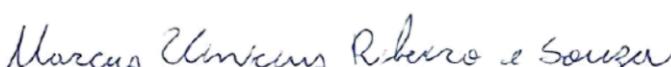
FILIFE ANDRADE LIMA PIMENTEL

**COMPORTAMENTO DE UMA MISTURA ASFÁLTICA MODIFICADA
PELAADIÇÃO DE FIBRAS SINTÉTICAS**

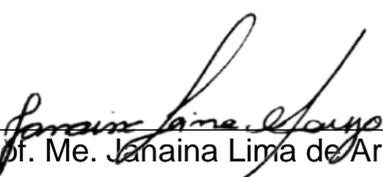
Monografia foi avaliada e apresentada
– àUFT Universidade Federal do
– TocantinsCampus Universitário de
Palmas, Curso de Engenharia Civil
para a obtenção dotítulo de Bacharel
e aprovada em suaforma final pelo
Orientador e pela Banca
Examinadora.

Data de aprovação 05/03/2021.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Marcus Vinicius Ribeiro e Souza (Orientador)
Universidade Federal do Tocantins



Prof. Me. Janaina Lima de Araujo
(Examinador)Universidade Federal do
Tocantins



Prof. Me. Yago Isaias da Silva Borges
Universidade Federal do Tocantins

Prof. Me. Yago Isaias da Silva Borges
Universidade Federal do Tocantins

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Edson e Taciana, que foram a base para todas as conquistas da minha vida e até hoje me oferecem apoio em todas as decisões da minha vida.

A mim, por ter mérito em cada etapa da construção de minha carreira acadêmica e profissional.

A meus amigos particulares, Cayo, João Vitor, Gabirel, Jerry, Marco Aurélio, Roberto, Alisson, Mariell, Lucas, Pedro Gabriel, João Gabriel, Felipe, Pedro, Anna Lara e Anna Karla, que sempre me deram apoio e estiveram presentes na minha vida pessoal, sendo esta fundamental no meu desenvolvimento pessoal e social. Agradeço por todos os momentos ao meu lado, que me permitiu compartilhar sonhos, conquistas, lutas e sofrimentos.

À Pedreira Gramprata, que me forneceu de forma gratuita o material necessário para a realização do presente estudo.

À Universidade Federal do Tocantins (UFT), que me disponibilizou espaço para me profissionalizar em Engenharia Civil, com ótimos professores e servidores. Agradeço ao esforço que permitiu minha evolução acadêmica até os dias de hoje.

Ao meu orientador e Professor Dr. Marcus Vinicius Ribeiro e Souza, que se colocou à disposição para orientar com atenção. Agradeço por todo o tempo fornecido e pela preocupação em todas as correções e reuniões, para que surgisse um trabalho digno.

E a todos que colaboraram direta e indiretamente para a finalização deste trabalho.

O destino não é uma questão de sorte, é uma questão de escolha, não é algo a se esperar, é algo a se conquistar.”

William Jennings Bryan

RESUMO

O presente trabalho propôs o desenvolvimento de uma mistura asfáltica modificada com a adição de uma mescla de fibras de polipropileno e aramida, para teores 0,5%, 1,0% e 1,5% adicionados em relação a peso do ligante. O ligante utilizado na pesquisa corresponde a um CAP50/70 e os agregados foram graníticos coletados em pedreira situada na região da cidade de Palmas – TO. Após a devida dosagem da mistura avaliou-se o comportamento mecânico das misturas segundo a metodologia Marshall e complementou-se o estudo por ensaio de resistência tração por compressão diametral. Dos resultados se observou que o teor ótimo sem adição de fibras que atende as normativas é o teor de 5 % de ligante. Já os teores com adição de fibras promoveram ganho de resistência a tração e queda significativa na relação betume / vazios. Além disso ao se adicionar fibras constatou-se uma melhora na estabilidade da mistura asfáltica. Os resultados se apresentaram promissores, mostrando um potencial elevado da adição de fibras, justificando assim a possibilidade da criação de normativas específicas á categoria.

Palavras-chave: Concreto asfáltico modificado, fibras sintéticas, Aramida e Polipropileno.

ABSTRACT

The present work proposed the development of a modified asphalt mixture with the addition of a mixture of polypropylene and aramid fibers, for contents of 0.5%, 1.0% and 1.5% added in relation to the weight of the binder. The ligand used in the research corresponds to a CAP50 / 70 and the aggregates were granitic collected in a quarry located in the region of the city of Palmas - TO. After the proper dosage of the mixture, the mechanical behavior of the mixtures was evaluated according to the Marshall methodology and the study was complemented by a tensile strength test by diametrical compression. From the results, it was observed that the optimum content without added fibers that meets the standards is the content of 5% of binder. The contents with added fibers promoted a gain in tensile strength and a significant drop in the bitumen / voids ratio. In addition, when adding fibers, an improvement in the stability of the asphalt mixture was found. The results are promising columns, showing a high potential for the addition of fibers, thus justifying the possibility of creating specific regulations for the category.

Keywords: Modified asphalt chroncrete, synthetic fibers, Aramid and Polypropylene.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Organograma da análise química do ligante asfáltico.....	14
Figura 2: Ligante CAP 50/70.....	27
Figura 3: Agregados utilizados.....	28
Figura 4: Agitador mecânico.....	30
Figura 5: Medição do comprimento da brita.....	32
Figura 6: Frasco Chapman.....	33
Figura 7: Ensaio de densidade do Pó de Pedra.....	34
Figura 8: Secagem leve da amostra para pesagem saturada.....	35
Figura 9: Lavagem de amostra.....	36
Figura 10: Ensaio de adesividade.....	37
Figura 11: Fibras de polipropileno e aramida.....	38
Figura 12: Fibras utilizadas no projeto.....	39
Figura 13: Amostras compactadas iniciais sem fibra.....	41
Figura 14: Estufa pré-preparada para compactação.....	42
Figura 15: Acompanhamento do ligante previamente execução de misturas.....	43
Figura 16: Execução da mistura.....	43
Figura 17: Compactador Marshall.....	44
Figura 18: Preparação de amostra não compactada.....	45
Figura 19: Equipamento Rice Test.....	46
Figura 20: Leitura de altura e diâmetro dos corpos de prova.....	47
Figura 21: Pesagem submersa de amostra.....	47
Figura 22: Secagem leve de amostra saturada em sua pré-pesagem.....	48
Figura 23: Destilador.....	49
Figura 24: Corpos de prova em banho maria.....	49
Figura 25: Rompimento de amostra.....	51
Figura 26: Molde para ensaio de tração por compressão diametral.....	54
Figura 27: Resultado do ensaio de adesividade conforme teor de fibras.....	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Parâmetros mínimos da mistura.....	24
Quadro 2: Especificações técnicas dos ligantes.	25
Quadro 3: Características do ligante.	26
Quadro 4: Faixas Granulométricas do DNIT	28
Quadro 5: Massa mínima por amostra de ensaio.....	29
Quadro 6: Peneiras utilizadas conforme série.....	30
Quadro 7: Massa mínima por amostra de ensaio.....	31
Quadro 8: Características das fibras.	38
Quadro 9: Correção da Estabilidade, pela espessura do corpo de prova.	50
Quadro 10: Distribuição granulométrica dos agregados minerais.	56
Quadro 11: Resultado densidade e absorção dos agregados.....	57
Quadro 12: Pesagem e % passante das peneiras $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{8}$ ".....	58
Quadro 13: Número de grãos medidos conforme fração.	58
Quadro 14: Resultado índice de forma.....	59
Quadro 15: Medidas e resultados Rice Test.	60
Quadro 16: Medidas e resultados de DMT e GMM obtida pelo Rice Test.	62
Quadro 17: Medidas e parâmetros Marshall.	63
Quadro 18: Resultado do teor de projeto.	65
Quadro 19: Medidas e parâmetros Marshall por teor de fibra.	67
Quadro 20: Resultado de resistência a tração.	69
Quadro 21: Resultado de Tenacidade.....	73

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva Granulométrica dos agregados.....	56
Gráfico 2: Curva da massa específica máxima teórica conforme Rice Test.	61
Gráfico 3: Comparativo dos resultados da massa específica máxima (DMT).....	62
Gráfico 4: Densidade aparente.....	64
Gráfico 5: Massa específica máxima teórica.....	63
Gráfico 6: Volume de vazios.....	65
Gráfico 7: Volume de agregado mineral.....	64
Gráfico 8: Relação betume / vazios	64
Gráfico 9: Estabilidade Marshall sem fibras.....	66
Gráfico 10: Fluência sem adição de fibras.....	65
Gráfico 11: Relação betume / vazios e Volume de vazios versus Teor de CAP.....	66
Gráfico 12: Densidade aparente.....	68
Gráfico 13: Massa específica máxima teórica.....	67
Gráfico 14: Volume de vazios.....	69
Gráfico 15: Volume de agregado mineral.....	68
Gráfico 16: Relação betume / vazios x Teor de fibra.	68
Gráfico 17: Estabilidade Marshall.....	70
Gráfico 18: Fluência com adição de fibras.	69
Gráfico 19: Força x Deslocamento.....	71
Gráfico 20: Resultado da resistência a tração.....	70
Gráfico 21: Resistência a tração por deformação para teor de 0,0 %.	70
2 Gráfico 22: Resistência a tração por deformação para teor de 0,5 %.	70
3 Gráfico 23: Resistência a tração por deformação para teor de 1,0 %.	70
3 Gráfico 24: Resistência a tração por deformação para teor de 1,5 %.	70

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico usinado a quente
CNT	Condeferação Nacional dos transportes
CONAMA	Condeferação Nacional do Meio Ambiente
CPA	Camada porosa de atrito
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAP	Emulsão asfáltica de petróleo
FM	Fluência <i>Marshall</i>
PMF	Pré-mistura a frio
RBV	Relação Betume/Vazios
SAM	<i>Stress Absorbing Membrane</i>
SMA	<i>Stone matrix asphalt</i>
SAMI	<i>Stress Absorbing Membrane Interlayer</i>
UV	Ultravioleta
VAM	Volume do agregado mineral
VCB	Vazios com Betume
Vv	Volume de Vazios

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. Cenário atual brasileiro.....	8
1.2. Histórico da pavimentação	8
1.3. Objetivos	10
1.3.1. Objetivo Geral	10
1.3.2. Objetivos Específicos	10
1.4. Justificativa.....	10
1.5. Problema	11
1.6. Hipótese	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1. Ligantes asfálticos	12
2.1.1. Composição Química.....	13
2.1.2. Ligantes Asfálticos Modificados	15
2.2. Fibras.....	17
2.2.1. Fibras Naturais.....	17
2.2.2. Fibras Minerais.....	18
2.2.3. Fibras Metálicas	19
2.2.4. Fibras Poliméricas.....	19
2.3. Materiais compósitos.....	20
2.3.1. Materiais Compósitos Fibrosos	21
2.3.2. Adição de Fibras em Misturas Asfálticas.....	23
3. METODOLOGIA	24
3.1. Caracterização do Ligante	24
3.2. Caracterização dos Agregados	27
3.2.1. Granulometria	29
3.2.2. Índice de forma	31
3.2.3. Densidade e absorção	32
3.2.3.1. Agregado miúdo.....	32
3.2.3.2. Agregado gráudo	34
3.2.4. Adesividade.....	36
3.3. Caracterização das Fibras	37
3.4. Dosagem e execução da mistura	40

3.5. Caracterização da mistura	44
3.5.1. Rice Test	44
3.5.2. Parâmetros Marshall	46
3.5.3. Resistência a tração por compressão diametral	53
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	55
4.1. Introdução	55
4.2. Resultados e análise da caracterização dos agregados	55
4.3. Resultados e análises das misturas	60
4.3.1. Rice test	60
4.3.2. Parâmetros Marshall	61
4.3.3. Resistência a tração por compressão diametral	69
5. Conclusão	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

1. INTRODUÇÃO

1.1. Cenário atual brasileiro

É de conhecimento geral que a infraestrutura, para o setor de transportes, afeta de forma significativa nas questões relacionadas a desenvolvimento econômico dos países e também diretamente na qualidade de vida da população. Entretanto apesar do conhecimento sobre estes impactos, de acordo com o Fórum Econômico Mundial 2017 em um relatório de 2016-2017, o Brasil ocupa a colocação 111^a com relação à infraestrutura das rodovias, sendo que 138 países foram pesquisados. Esta situação é preocupante, visto que esse é um dos principais pontos para tornar-se um país competitivo no mercado global, além do mais, a qualidade do transporte atinge diretamente na redução de custos de mercadorias para exportação e consumo doméstico.

De acordo com o IBGE, o impacto sobre o comércio faz com que o frete de mercadorias atinjam 7,7% dos gastos. Com relação ao setor de serviços, que é o que mais afeta o PIB brasileiro, a influência chega a afetar 4,2% de todos os custos operacionais da economia brasileira. O setor mais afetado é o da indústria extrativa, que no país se destaca principalmente na parte de exportações, e possui um gasto equivalente a 14,4%.

De acordo com a CNT (2019) o modal rodoviário brasileiro apresenta uma malha pavimentada muito pequena, correspondendo apenas a 12,3% do total de rodovias, além disso, é constatado que a densidade da malha se apresenta bem inferior se comparada a países com dimensões semelhantes, sendo assim, pode-se concluir que existe um fluxo maior por alguns trechos, contribuindo com a situação atual que se encontram as rodovias, trazendo assim, de maneira mais a tona a importância de asfaltos mais resistentes.

1.2. Histórico da pavimentação

É indiscutível a importância da pavimentação para o mundo, estando à mesma diretamente ligada com a evolução da humanidade, sendo responsável por contribuir para o crescimento de diversas nações em todos os continentes do planeta, tanto com relação ao transporte de cargas, como também o de pessoas.

Apesar de toda a evolução da pavimentação, é fundamental o desenvolvimento de novas tecnologias a fim de obtermos melhores resultados tanto quanto a segurança e conforto de pavimentos quanto a menores custos de produção, execução e manutenção dos mesmos. Devido à importância da melhoria de materiais, principalmente na área da construção civil, o homem vem criando com o passar dos anos novos materiais compósitos.

De acordo com os registros históricos, foi possível observar que o incremento de materiais é muito antigo, havendo a aplicação de técnicas para reforço do solo em algumas partes da construção da muralha da China, em estradas no Peru, as quais foram executadas pelos incas e incrementadas com o uso de lã de lhama (PALMEIRA, 1992). Posteriormente, já em 1902, foi construída em Cannes na França, a primeira estrada modificada na Europa. Em seguida destacou-se o uso de mantas de algodão em 1926 pelo Departamento de Estradas da Carolina do Sul, EUA a fim de reforçar e melhorar as propriedades de resistência nas camadas asfálticas dos pavimentos, sendo assim este episódio pode ser considerado como o precursor dos asfaltos modificados com fibras conforme conta no livro “ A História da Locomoção Terrestre” de 1936.

De acordo com o livro “ A memória da pavimentação no Brasil” de 2001, a pavimentação no Brasil surgiu em 1560, porém a introdução de pavimentos modificados por polímeros na malha rodoviária se fez presente só em 1974 em um trecho curto, o qual corresponde a 275m, com a utilização de CAP modificado com resina epóxi na BR-116. Em seguida asfalto modificado foi usado na ponte Rio-Niterói, sendo sua modificação a introdução de 15% de resina epóxi líquida somada a 40% de um extrato aromático e um reticulador, porém apesar de apresentar bons resultados, sua popularização se tornou inviável devido seu custo elevado, sendo avaliada como alternativa somente em obras especiais.

Futuramente foram realizados pequenos experimentos no Rio de Janeiro, mais especificamente nas Avenidas Atlântica e Brasil e no aeroporto Santos Dumont, com a adição de látex no tambor misturador, contudo os resultados foram negativos, ocasionados por uma heterogeneidade da mistura asfáltica.

Por fim, mais relacionado ao tema do presente trabalho, segundo Mello et al. (2008), a adição de fibras poliméricas de aramida e polipropileno se apresentaram benéficas em misturas asfálticas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento de uma mistura asfáltica modificada pela adição de fibras sintéticas. Para isso o trabalho leva em conta o uso de uma mistura de duas fibras diferentes, sendo elas de aramida e polipropileno, e visa prioritariamente por meio de um estudo laboratorial realizar o comparativo entre a mistura asfáltica convencional (sem fibras) e a mistura modificada com ambas as fibras, a fim de determinar se houve melhoria nas propriedades mecânicas da mistura.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Avaliar o comportamento mecânico das misturas conforme diferentes gradientes de fibras;
- Avaliar a influência da adição de fibras na mistura asfáltica, principalmente com relação à resistência a tração por compressão diametral;

1.4. Justificativa

Devido a ausência de uma solução definitiva barata para todas as problemáticas encontradas nos pavimentos, o desenvolvimento tecnológico tem se apresentado como ferramenta capaz de mudar o estado do pavimento nacional. Os mais diversos tipos de materiais estão sendo estudados e introduzidos na pavimentação desde 1974, entretanto a utilização de materiais recicláveis e polímeros se destacam nesse cenário.

Basicamente os asfaltos que apresentam a adição de polímero em sua composição promovem aumento na sua faixa de temperaturas para aplicação, que no Brasil é importante devido à ampla variação térmica do território nacional, também podem ser citados outros benefícios, como por exemplo: maior resistência à fadiga, maior coesão e menor taxa de envelhecimento.

Por fim, segundo o estudo “impactos da qualidade do asfalto sobre o transporte rodoviário”, promovido pela CNT em Brasília no ano de 2019, é de entendimento entre

os especialistas que a utilização de elementos de reforço em camadas asfálticas é uma proposta adequada para as problemáticas encontradas no país.

1.5. Problema

A utilização de misturas asfálticas modificadas com fibras poliméricas de aramida e polipropileno é capaz de promover melhorias nas misturas asfálticas ao ponto de melhorar as propriedades mecânicas na mistura?

1.6. Hipótese

O asfalto gerado pela nova composição é capaz de melhorar a resistência à tração por compressão diametral se comparado aos modelos tradicionais utilizados no Brasil, tornando-se uma solução viável para melhorar a qualidade das rodovias nacionais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a realização de um novo projeto de revestimento asfáltico, se faz necessário compreender o funcionamento do ligante usualmente usado, também se deve entender as propriedades e características próprias das fibras, bem como os resultados obtidos a partir da formação dos materiais compósitos, afim de que se possa, através da pesquisa, melhorar a qualidade dos asfaltos brasileiros principalmente com relação à coesão do material, resistência a tração por compressão diametral.

Portanto, nesta porção do trabalho, serão apresentadas as principais definições das características físicas do asfalto convencional, bem como do asfalto modificado com adição de fibras de polipropileno e aramida.

2.1. Ligantes asfálticos

Os asfaltos são basicamente materiais aglutinantes, os quais tem por predominância uma cor escura, podendo ser preto ou até mesmo marrom escuro, sua consistência também é variável, abrangendo desde semissólidos até características mais fluidas. Sua obtenção ocorre através de jazidas na natureza ou pela destilação do petróleo, sendo que as características do petróleo determinam a qualidade do asfalto bem como suas propriedades físicas, químicas e reológicas, porém o fator preponderante que o caracteriza como tal, é a presença de betume em sua constituição.

De acordo com sua tese, Pizzorno (2010) afirma que o betume é o elemento aglutinante ativo que está presente na maior parte do asfalto. Trata-se de uma mistura de hidrocarbonetos pesados, solúveis em bissulfato de carbono, tricloroetileno e com grande poder de aglutinar agregados. (PIZZORNO, 2010).

Com relação às características do asfalto, pode-se descrevê-lo como um adesivo termoviscoelástico, impérvio a água, com alta capacidade de resistência a ataques químicos devido à pouca reatividade com relação a maioria dos materiais. Vale ressaltar que conforme a temperatura, o material pode ter comportamento termoviscoelástoplástico.

Pode-se concluir que o ligante betuminoso é basicamente um adesivo semissólido à temperatura ambiente, prioritariamente viscoelástico, que por hora é um

sólido a temperaturas menores ou ao sofrer carregamentos rápidos, e atua como um fluido viscoso a temperaturas elevadas ou durante carregamentos lentos.

2.1.1. Composição Química

Tendo em vista que existe uma extensa gama de variedades de petróleos e suas origens, se torna imprescindível conhecer mais a fundo as características químicas do petróleo, pois sua tipologia juntamente com o processo de obtenção são os principais fatores por afetar os desempenhos físicos e mecânicos das misturas asfálticas, entretanto seu principal impacto está diretamente relacionado com o processo de incorporação de agentes modificadores, como por exemplo, polímeros.

Segundo Shell (2003), são explorados pelo mundo cerca de 1500 tipologias de petróleos, entretanto apenas uma pequena parte pode ser considerada como adequada para a produção de misturas asfálticas. Dentre os principais destacam-se os petróleos Boscan e Bachaquero, conhecidos mundialmente e encontrados na Venezuela (SHELL, 2003).

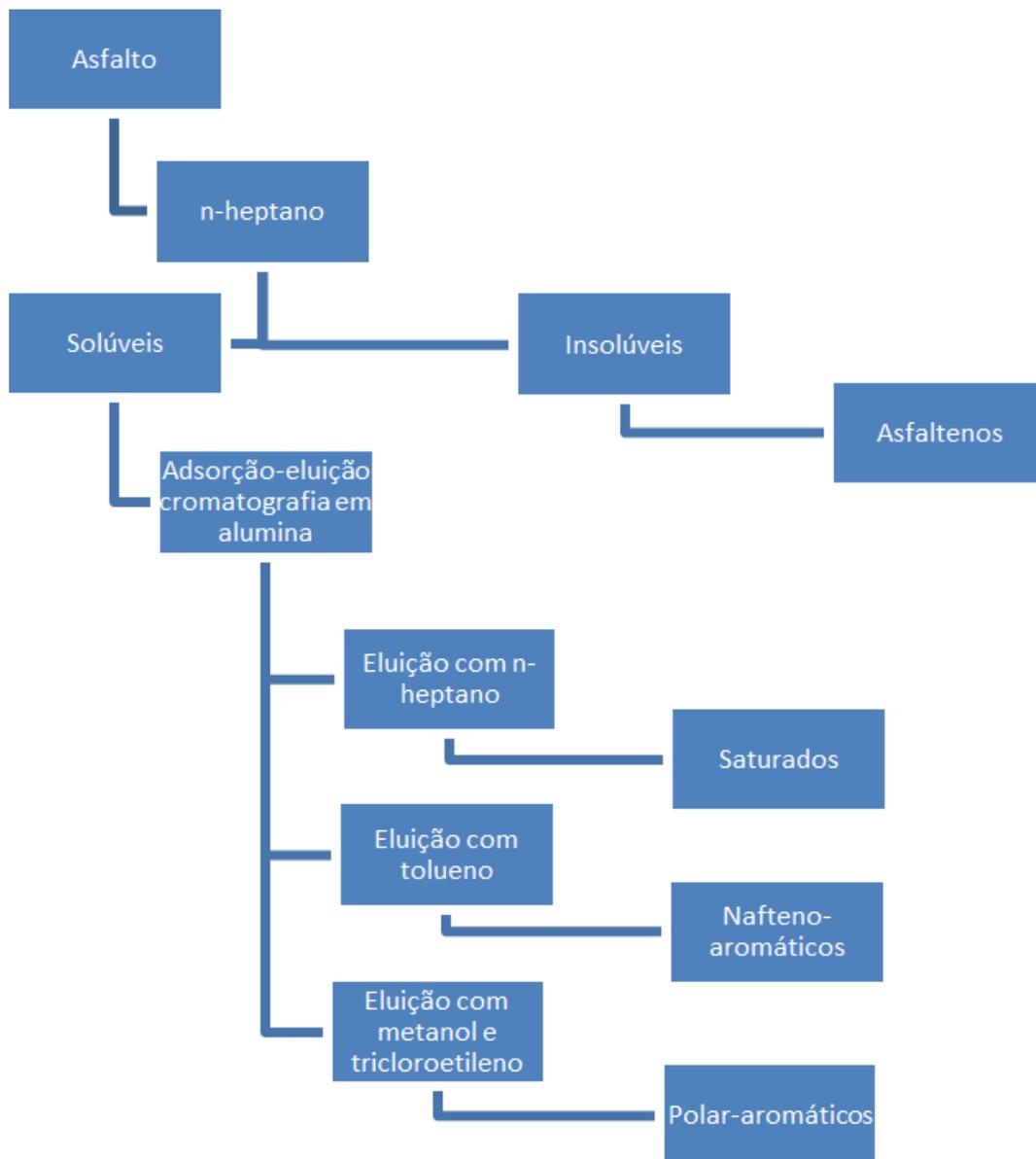
Com relação às características moleculares dos asfaltos segundo Goodrich, o asfalto possui massa molar entre 300 e 2.000 M, apresentando, em sua composição, 95% de hidrocarbonetos, 5% de enxofre, 1% de nitrogênio e oxigênio e 2.000ppm de metais (V, Ni, Fe e outros). (GOODRICH, 1986, apud LEITE, 1999).

Recentemente novas pesquisas surgem detalhando ainda mais os componentes dos CAPs (Cimento asfáltico de petróleo). Conforme Shell, a quantidade de carbono oscila de 82 a 88%; hidrogênio de 8 a 11%; oxigênio pode chegar até 1,5%; nitrogênio até 1% e o enxofre vai de 0 a 6%. (SHELL, 2003).

Apesar da composição química referente aos átomos presentes no ligante asfáltico nos fornece muitas informações sobre possíveis características do CAP, é de mais valia, compreender as propriedades químicas de acordo com o tipo de fracionamento o qual foi submetido. Sobre as tipologias de separação por fracionamento, existem duas metodologias que ganham destaque, sendo uma normalizada segundo a ASTM D 4124-01 e a outra é o método comumente empregado na Europa, denominado SARA. Vale ressaltar que ambos os sistemas separam o asfalto por n-heptano, seguidamente por adsorção de maltenos em alumina e posteriormente por desorção com solventes de polaridade crescente.

Conforme exposto a ASTM D 4124-01, a divisão do CAP se faz em quatro principais componentes, sendo eles: saturados, nafteno-aromáticos, polar- aromáticos e asfaltenos.

Figura 1: Organograma da análise química do ligante asfáltico.



Fonte: Adaptado da ASTM.

Tendo em consideração o método SARA, ele também se divide em quatro principais constituintes, se assemelhando muito com método ASTM. Basicamente os constituintes são: asfaltenos, aromáticos, saturados e resinas. Os asfaltenos são os grandes responsáveis por afetar as propriedades reológicas da mistura, pode compor cerca de 5 a 25% do material e conforme aumentar a sua quantidade, mais duro e viscoso é o asfalto. Sobre os componentes aromáticos sabe-se que sua presença varia entre 40 a 65% da mistura, sendo o componente em maior quantidade, além disso, é o responsável por produzir um líquido viscoso amarelo polar. A parte saturada da mistura compõe 5 a 20% da mistura, sendo basicamente óleos viscosos não polares. Por fim tem-se o segundo elemento mais impactante, as resinas, estas são sólidas ou semissólidas de coloração marrom-escuro com características adesivas. Seu destaque é notável por ser o responsável por direcionar se o asfalto vai possuir uma característica de solução ou gelatinosa.

Segundo Leite (1999) na tese “Estudo de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímeros”, as propriedades de cada componente do asfalto são resumidas nos seguintes tópicos:

- Asfaltenos são os responsáveis por melhorar a suscetibilidade térmica e aumentar a viscosidade;
- Aromáticos são os responsáveis por melhorar as propriedades físicas, além de atuar como elementos plastificantes;
- Saturados são os responsáveis por piorar a suscetibilidade térmica, além de amolecer o asfalto;
- Resinas são os responsáveis por melhorar a ductilidade do asfalto, auxilia na dispersão dos asfaltenos, porém piora a suscetibilidade térmica.

2.1.2. Ligantes Asfálticos Modificados

A utilização de agentes modificadores em diversos materiais ganha destaque na área de inovações tecnológicas, e com o asfalto não seria diferente. Como a maioria dos materiais a finalidade de se modificar o asfalto está diretamente ligada à busca por melhorias em suas propriedades, no caso do asfalto o intuito é obter benefícios nas características mecânicas, químicas e reológicas.

Segundo a pesquisa rodoviária “Impactos da Qualidade do Asfalto sobre o Transporte Rodoviário” de 2019, os benefícios propostos pela modificação impactam diretamente nas questões financeiras, visto que se reduz a frequência das manutenções pelo aumento da durabilidade, interrompendo menos o trânsito para reparos. Além disso, o asfalto pode melhorar seu desempenho com relação à fadiga ao se ajustar a viscosidade e elasticidade da mistura conforme as alterações da faixa de temperatura.

Segundo Morilha (2014) o ligante asfáltico tradicional adicionado de algum componente visa aumentar as seguintes propriedades do asfalto, são elas: durabilidade, capacidade de recuperação elástica, resistência à deformação definitiva e retardamento do processo de envelhecimento. (MORILHA JR., 2004).

Com relação aos tipos de modificadores de asfalto, os mais comuns e que possuem mais realce são os polímeros. Os polímeros possuem várias categorias de classificação, as principais descritas no “Estudo de asfaltos modificados por polímeros do tipo RET (Terpolímero Elastomérico Reativo) para aplicações em pavimentos” (Negrão, 2006), são:

- Quanto à ocorrência: Naturais e Sintéticos;
- Quanto à preparação: Adição e Copolímeros;
- Quanto à cadeia: Homogêneos e Heterogêneos;
- Quanto à estrutura: Lineares ou Tridimensionais;
- Industrial: Elastômeros, Plásticos e Fibras.

De acordo com o estudo proposto no projeto de pesquisa, é de maior interesse a última classificação apresentada. Esta divide os tipos de polímeros conforme o comportamento frente às variações térmicas, entretanto existe uma divergência entre autores, sendo mais aceita as categorias sugeridas por Mano (1985, 1991) e Leite (1999). Conforme a bibliografia apresentada por estes autores, os polímeros possuem quatro divisões e serão explanadas uma a uma a seguir.

Polímeros elastômeros são basicamente os que se desmancham previamente ao amolecimento, e possuem características elásticas. Exemplo mais conhecido é o SBR.

Polímeros termoplásticos são caracterizados por se fundir e se tornar maleáveis de forma reversível ao serem esquentados, normalmente sua adição no asfalto se faz a elevadas temperaturas e seu representante mais comum é o polipropileno.

Elastômeros termoplásticos se caracterizam por variar seu comportamento conforme a temperatura, possuindo propriedades elásticas em temperaturas mais amenas e propriedades plásticas ao ser aquecido. Exemplo desse polímero é o EVA.

Por fim têm-se os termorrígidos, que se difere dos outros por não se fundir, apesar de que ao ultrapassarem a temperatura limite sofrerem degradação, além de ao atingir determinada temperatura assumem a forma sólida de maneira irreversível. Um exemplar desse polímero são as resinas, destacando-se a resina epóxi.

2.2. Fibras

Na época atual as fibras já se tornaram comumente elementos presentes na engenharia, no mercado atual existe uma grande variedade de tipos de fibras, com formas e tamanhos diferentes, possibilitando assim inúmeras aplicações. Cabe ao operador avaliar o objetivo a ser atingido para que se determine qual a tipologia e dimensão de fibra mais adequada ao seu caso. Sendo assim obrigatoriamente faz-nos compreender sobre as características mecânicas, químicas de cada tipologia de fibra, para que se possa entender a proveniência de seus benefícios.

Basicamente existem quatro principais classes de fibras, sendo elas: naturais, poliméricas, minerais e metálicas.

De acordo com Bento (2006), “Suas características, que também irão afetar diretamente a matriz a que se misturam, são inerentes ao tipo de material que são compostas e seu processo de fabricação. Assim, torna-se de fundamental importância o conhecimento do mecanismo de interação matriz-reforço e da parcela de contribuição de cada um deles para um bom desempenho do conjunto, assim como a definição do tipo de fibra a ser utilizada”.

2.2.1. Fibras Naturais

As fibras naturais foram as pioneiras quanto ao uso de fibras, seu uso é datado desde muito tempo, sendo visível seu emprego ao se percorrer a história da humanidade.

Com relação as suas propriedades, elas se destacam devido à alta tenacidade e alta resistência, porém o meio externo possui alta influência sobre as mesmas, Segundo Teodoro (1999), a exposição das fibras vegetais em ambientes alcalinos causa uma rápida degradação das fibras. Em acréscimo observa-se que são bons absorventes de água, o que ocasiona retrações diferencial devido a sua expansão.

2.2.2. Fibras Minerais

Tratando-se de fibras minerais, existem três tipologias utilizadas na área da construção civil, que são as fibras de vidro, fibras de amianto e fibras de carbono.

Sobre as fibras de amianto, também conhecidas como fibras de asbestos, sabe-se que comumente de acordo com Taylor (1994) possuem diâmetro muito pequeno, resistência a tração de aproximadamente 1000MPa e um módulo de elasticidade de cerca de 160GPa. Entretanto apesar de possuir características mecânicas passíveis de uso no dia a dia, ela é proibida em diversos países devido a agredir a saúde humana, pois caso as fibras sejam rompidas, elas liberam partículas muito finas de ao serem aspiradas pelo homem podem afetar os pulmões dos indivíduos que mantiveram contato com as fibras.

As fibras de vidro de acordo com Higgins (1982) possuem excelente resistência à tração, ótima estabilidade dimensional, boa resistência a ataques químicos e ataque da corrosão, além de boas propriedades elétricas. Seus benefícios vão além, visto que ao ser aquecido até 340°C perde apenas 50% de sua resistência. Existem vários tipos de vidros fabricados pelo homem, o mais usual para a produção de fibras são os vidros tipo E, os quais possuem a peculiaridade de baixa resistência ao ataque de álcalis.

As fibras de carbono são o destaque desta categoria, se tornando mais famosas devido à boa relação entre propriedades mecânicas e peso. Segundo Taylor (1994) a resistência que a fibra promove ocorre devido às ligações entre os átomos de carbono. Além das boas propriedades mecânicas as fibras de carbono possuem alta rigidez, boas propriedades elétricas e boa estabilidade dimensional. Sua resistência à tração e modulo de elasticidade equivalem a cerca de 420GPa e são essas características que promovem uma boa interação entre fibra e matriz, sendo assim a única grande desvantagem é com relação aos ataques químicos, que devem ser evitados para que não haja uma mudança estrutural na composição da fibra.

2.2.3. Fibras Metálicas

Sobre essa categoria, existe uma única fibra que ganha destaque na maioria dos estudos, é a fibra de aço. Esta fibra apresenta ótimos valores de resistência e fácil fabricação, visto que as mesmas podem ser feitas em diversos formatos conforme a necessidade da interação matriz-fibra. Entretanto sua principal limitação são os problemas ligados à corrosão, sendo recomendado seu uso de forma que não fique exposta, isso promove problemas em seu uso quando se diz respeito ao compósito asfalto, porém pode ser viável para outros tipos de concretos.

De acordo com Figueiredo (2000), as fibras de aço são fibras de alto módulo, sendo que seu foco não é exclusivo para a redução do número de fissuras em concreto, podendo também melhorar a capacidade mecânica do compósito a qual ela está inserida.

2.2.4. Fibras Poliméricas

As fibras poliméricas são as que apresentam uma gama mais vasta de tipos de fibras, isto ocorre devido ao investimento feito nessa área pela busca de novos materiais e também devido ao processo de produção dos polímeros. Nesta categoria vale-se ressaltar que as fibras podem ser produzidas em vários formatos, podendo ser fibrilado, trançado ou até mesmo na forma de laminetes. A seguir detalharemos alguns dos principais tipos de fibras de polímero.

Sobre as fibras de polietileno, segundo Heineck (2002), são fibras que apresentam um reduzido módulo de elasticidade, tornando a relação fibra-matriz fraca, entretanto esse tipo de fibra possui destaque com relação a resistência aos ataques dos álcalis. A conclusão final de Heineck (2002), é que o polietileno de alta densidade (PEAD) é o que melhor dentre estes, pois possui uma melhor capacidade de se aderir a matriz e também o módulo de elasticidade mais elevado. De acordo com Hannant, (1994), fibras desse material são de elevada durabilidade e elevada deformação de fluência, ou seja, caso a fibra seja submetida a altas tensões durante um longo período de tempo, ela irá tender a sofrer alterações ao longo do tempo sem romper.

Fibras de poliéster basicamente são de elevada resistência, rigidez e densidade. Suas características são próximas ao polipropileno, entretanto seu custo total é maior. Com relação a este tipo de material se destaca o PET, material muito

comum para a produção de embalagens de produtos, porém seu uso é questionado nos últimos anos devido gerar impactos ambientáveis significantes, cabendo nos dias atuais, ser substituído por algum material mais ecologicamente correto. Porém com relação ao seu uso em fibras, devido à possibilidade de reciclagem, seu uso se torna viável devido a atual abundância desse material. Trabalhos com fibras de PET já foram desenvolvidos e mostram benefício desse tipo de fibra, segundo Montardo et. al. (1998) para um mesmo teor de fibra de 0,25%, foi observada uma relação positiva entre a resistência e o comprimento das fibras.

As fibras de aramida, também conhecidas como fibras de poliamida, esse fato se dá devido a sua composição química, que em resumo, é uma fibra manufaturada composta por uma extensa cadeia de poliamida sintética, com um mínimo de 85% de ligações amida em sua composição. Sobre essas fibras vale ressaltar que seu estado natural é variável, podendo ser produzidas em fios, segmentos curtos, polpa e tecidos. De acordo com Salaverría as fibras de aramida possuem resistência a tração de cerca de 3150 MPA. De acordo com Hollaway (1994), é um tipo de fibra que se destaca no quesito tração, pois sua resistência nesse sentido se apresenta cinco vezes maior que a do aço, além disso, as fibras de aramida possuem ótima estabilidade térmica e dimensional, tornando-a bem resistente a desgaste e elevadas temperaturas. Sua desvantagem está relacionada aos esforços de compressão, devido ser facilmente dobrável e quebrável e também a sua baixa resistência a raios UV, tornando assim uma fibra inadequada para ambientes externos.

Com relação às fibras de polipropileno, resumidamente são fibras com comportamento termoplástico, ou seja, ao serem aquecidas elas passam a se comportar como material plástico. Essas fibras possuem as seguintes características: Alta flexibilidade, alta tenacidade, alta resistência a ataques químicos e de álcalis. Durante anos diversos experimentos foram realizados com essa tipologia de fibra, os principais resultados, segundo Caproni Junior al. (1999), informam que o teor ideal de fibras corresponde a 0,25%, além disso, a pesquisa realizada por ele indicou que o aumento do comprimento das fibras não gera benefícios quanto resistência à tração.

2.3. Materiais compósitos

O surgimento da nomenclatura “material compósito” ocorreu por volta do século XX, e tem como definição “material formado por duas ou mais partes distintas”, ou seja, basicamente corresponde a qualquer insumo composto por dois ou mais

elementos, os quais são elementos não miscíveis e possuem propriedades mecânicas e químicas diferentes entre eles. (CALLISTER, 2012).

Entretanto, é extremamente comum encontrarmos na natureza materiais que atendem a definição apresentada, a fim de se delimitar de maneira mais eficiente os materiais que são considerados compósitos, fora incrementada a seguinte definição. Segundo Chawla apenas os materiais fabricados pelo homem podem ser categorizados como materiais compósitos. (CHAWLA, 2011).

Com relação à estruturação dos materiais compósitos, normalmente é dividida em duas partes, a matriz e o reforço. A matriz é responsável por proteger o reforço do ambiente externo e transmitir os esforços para o reforço, comumente compõe a maior porcentagem do material. O reforço possui a função de fornecer rigidez e resistência ao material, e pode ser apresentado na forma de partículas ou fibras. Os compósitos mais utilizados adotam comumente matrizes poliméricas e reforços fibrosos.

2.3.1. Materiais Compósitos Fibrosos

Devido à época de alta da produção dos materiais compósitos, uma série de novos materiais são formados a cada dia, entretanto mesmo como sua diversidade fora notada um padrão referente a esses materiais, podendo ser categorizados em dois grupos distintos, são eles: materiais compósitos particulados e os fibrosos.

Correspondendo aos interesses do presente projeto, serão apresentados pontos referentes ao segundo grupo já mencionado.

Segundo Taylor (1994), o grande destaque obtido através da inserção de fibras para a formação de materiais compósitos é com relação ao estado pós-fissuração ao invés do pré-fissuração, pois consoante seu raciocínio as fibras são responsáveis por absorver as cargas excedentes logo após o início do aparecimento de fissuras. O mesmo acrescenta, que para que as fibras possam melhorar o desempenho do material antes de seu rompimento, seria necessário que a composição se apresentasse mais resistente que a matriz. (TAYLOR, 1994).

Em concordância com Johnston (1994), é notório que a atuação das fibras é de reforçar o compósito com relação a todos os carregamentos geradores de trações, flexões e cisalhamentos, sendo assim, suas melhorias afetam diretamente a ductilidade e tenacidade da matriz.

Em conformidade com Hannant (1994) as fibras não agem a fim de evitar a formação das fissuras, mas na verdade trata-se de um melhor controle da propagação

das fissuras, ou seja, apesar do incremento provocar um aumento na quantidade total de fissuras, suas dimensões como comprimento e espessuras são bem reduzidas, beneficiando a estrutura. Ele diz que as fibras auxiliam a manter as interfaces das fissuras próximas, melhorando capacidades mecânicas e por consequência melhorar a ductilidade. Além disso, de acordo com Hannant (1994), os principais fatores de influência nos compósitos são o teor de fibras, comprimento de fibra, características mecânicas próprias individuais da matriz e da fibra, além da capacidade de associação dos dois elementos.

A seguir consta um breve resumo dos principais aspectos e suas características.

- **Orientação das fibras:** Este fator influencia diretamente no potencial de utilidade da fibra, sendo seu potencial máximo aproveitado ao estar perpendicular ao sentido das fissuras, caso sua orientação se encontre paralela à direção das fissuras seu reforço e capacidade de transmissão de esforços pode ser nula, tornando-a ineficaz;
- **Comprimento da fibra:** Este aspecto afeta o compósito aumentando sua resistência conforme aumenta o tamanho da fibra, porém existe um tamanho ideal, determinado a partir de testes, que assim que superado não contribui com mais ganhos, além disso, ao aumentar o tamanho da fibra, a possibilidade de arrancamento durante seu uso é reduzido juntamente o índice de fragilidade;
- **Resistência da fibra:** Neste ponto é de fácil observação que conforme aumenta-se a capacidade de resistir a cargas da fibra, irá ocasionar um aumento na resistência a tração do compósito. Vale ressaltar que o aumento resistência possui dependência direta com a relação fibra- matriz, visto que caso o rompimento do material ocorra entre a fibra e a matriz, a resistência do material se manterá constante ao se incrementar a resistência da fibra;
- **Relação fibra-matriz:** Relação importante, pois pode determinar a funcionalidade da fibra. Comumente a evita o rompimento do elemento, reduz o comprimento e espessura das fissurações, por fim melhora a distribuição das fissuras na peça;
- **Teor de fibra:** Um dos fatores que mais se destacam, tende ao

umentar, melhorar a resistência a esforços mecânicos, porém possui um limite ideal o qual se superado, provoca redução da resistência de todo o componente. Seu comportamento conforme a índice de fragilidade e absorção de energia de deformação variam conforme fibras e também conforme autores, cabendo um estudo para possíveis previsões do comportamento do compósito;

- Módulo de elasticidade da fibra: Esta característica ao crescer tende a facilitar o arrancamento das fibras, porém auxilia na transmissão dos esforços, sendo assim existe um módulo ótimo a ser utilizado.

2.3.2. Adição de Fibras em Misturas Asfálticas

A adição de fibras em misturas asfálticas se iniciou há mais de 30 anos, porém sua introdução no comércio de maneira que seja implantada de forma acelerada é algo bem mais recente, esse fato se deve a somente nos últimos anos adquirirmos o conhecimento científico específico sobre seu comportamento em camadas asfálticas. Os principais conhecimentos na área foram concluídos nos anos 2000, e dentre eles vale-se comentar a seguinte série de estudos relacionados a seguir.

De acordo com Homem (2002), a inserção de fibras de vidro com um teor entre 0% e 1% em um asfalto poroso gerou benefícios quanto suas características de resistência mecânica, basicamente ao se acrescentar fibras e aumentar a temperatura, melhora o módulo de resiliência. Além disso, foi constatado que a relação do asfalto com a fibra proporcionou um asfalto mais impermeável e com menores deformações permanentes.

Souza (2010) em sua pesquisa constatou que ao se inserir fibras de polipropileno e aramida no concreto asfáltico (no caso do estudo CAP50/70) as características quanto a resistência a tração, vida de fadiga e módulo resiliência cresciam conforme o teor de fibras ia crescendo, vale ressaltar que a faixa de teor de fibras utilizadas em seu projeto foi cerca de 0% a 3%.

3. METODOLOGIA

A presente pesquisa tem por finalidade avaliar misturas asfálticas modificadas com fibras de aramida e polipropileno. Para a avaliação, foram realizados ensaios no LEGI (laboratório de engenharia geotécnica e infraestrutura) da Universidade Federal do Tocantins em Palmas – TO. O método adotado foi o Marshall, e os parâmetros mínimos de referência pertencem a norma do DNIT 031/2006 ES . Para construção dos corpos de prova, foi utilizado como ligante o CAP 50/70 e como agregados britas 1, britas 0 e pó de brita, para que possa ter uma elevada gama de tamanhos granulométricos.

O quadro 1 a seguir apresenta de forma resumida alguns dos principais parâmetros a serem obtidos conforme a metodologia aplicada no presente trabalho.

Quadro 1: Parâmetros mínimos da mistura.

Características	Método de ensaio	Camada de rolamento	Camada de Ligação (Binder)
Porcentagem de vazios (%)	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75 – 82	65 – 72
Estabilidade, mínima, (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500,000	500,000
Resistência à Tração por Compressão Diametral	DNER-ME 138	0,650	0,650

Fonte: Autoria própria.

3.1. Caracterização do Ligante

O ligante adotado foi o CAP 50/70, fornecido pela TECCON ENGENHARIA que em época realizava obras de manutenção na BR 153. Para uma correta caracterização do ligante, foram utilizados prioritariamente dados fornecidos pelo fabricante. A figura 2 a seguir demonstra parte do equipamento necessário para a caracterização de ligantes.

Figura 2: Exemplos de maquinário para caracterização de ligante.



Fonte: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto.

Os valores a seguir no Quadro 2 indicam os limites referentes ao CAP 50-70 dos ensaios realizados para a caracterização de ligantes, além de designar as normativas vigentes para cada característica dos ligantes.

Quadro 2: Especificações técnicas dos ligantes.

Características	Unida de	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	AST M
Penetração (100g,5s,25,°C)	0,1 mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de Amolecimento	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol		-	-	-	-		
a 135°C	s	192	141	110	80	NBR 14950	E 102
a 150°C		90	50	43	36		
a 177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
Viscosidade Brookfield a 135°C, SP 21, 20 rpm mín	cP	347	274	214	155	NBR 15184	D 4402
a 150°C, SP 21, mín		203	112	97	81		
a 177°C, SP 21, mín		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de Susceptibilidade Térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	-	-
Ponto de Fulgor mín	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25°C, mín	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D11 3

*Faixa grifada de vermelho indica a faixa de referência para o estudo.

Fonte: Adaptado Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto.

Os resultados analisados para a composição deste trabalho, advém de ensaios fornecidos pelo próprio fabricante perante 20 coletas realizadas. Ressalta-se que o fabricante não forneceu todos os resultados de todos os ensaios esperados, devido ao fato de que apenas os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e ponto de fulgor foram realizados tanto em fábrica quanto a obra, além destes fora realizados dois ensaios de viscosidade, sendo o Viscosidade Saybolt Furol a 135 °C realizado em obra e o Viscosidade Brookfield 135 GC-SP21 20RPM reproduzido na fábrica.

Ao se comparar os dados fornecidos pelo fabricante com as especificações técnicas exigidas pela metodologia ABNT e ASTM é possível concluir que o CAP 50/70 fornecido pela TECCON ENGENHARIA atende as normativas e seu uso se faz adequado para a realização do estudo.

Logo abaixo segue-se no Quadro 3 o resumo contendo as principais informações juntamente com a assinatura do engenheiro responsável.

Quadro 3: Características do ligante.

RESUMO DE RESULTADOS				FOLHA 1		Recebimento CAP DNIT - EM 095/06	
Obra: BR 153 - Crema 2ª Etapa				Segmento: Miranorte / Oliveira de Fátima			
Data de chegada na obra	Local da coleta	Laboratório				Entrega nº	Quantidade kg
		NBR 14950	NBR-6576	NBR - 11341	NBR - 6560		
		Viscosidade Saybolt-Furol 135 °C	Penetração 100g,5s,25°C	Ponto de fulgor min.	Ponto de amol.°C		
		minimo 141 s	50-70 (0,1mm)	°c 235	46 min	N/C	N/C
02/09/19	Veiculo	204	50,0	296,0	49,0	1	28.219
02/09/19	Veiculo	166	55,0	315,0	49,0	2	29.519
03/09/19	Veiculo	177	53,0	339,0	50,0	3	28.635
03/09/19	Veiculo	192	50,0	306,0	49,0	4	29.713
04/09/19	Veiculo	184	54,0	321,0	51,0	5	28.003
04/09/19	Veiculo	174	56,0	346,0	51,0	6	28.001
05/09/19	Veiculo	168	56,0	330,0	52,0	7	29.587
05/09/19	Veiculo	159	54,0	296,0	53,0	8	29.267
06/09/19	Veiculo	206	54,0	345,0	49,0	9	28.198
06/09/19	Veiculo	159	53,0	349,0	53,0	10	29.075
09/09/19	Veiculo	199	53,0	303,0	52,0	11	29.985
09/09/19	Veiculo	181	54,0	307,0	50,0	12	29.787
10/09/19	Veiculo	194	54,0	301,0	50,0	13	28.818
10/09/19	Veiculo	157	53,0	297,0	51,0	14	28.684
11/09/19	Veiculo	165	58,0	328,0	50,0	15	29.974
11/09/19	Veiculo	192	56,0	297,0	50,0	16	29.680
12/09/19	Veiculo	155	56,0	342,0	52,0	17	28.295
12/09/19	Veiculo	181	55,0	340,0	52,0	18	28.666
13/09/19	Veiculo	188	57,0	303,0	49,0	19	28.808
13/09/19	Veiculo	167	53,0	342,0	48,0	20	28.862

 TECCON S/A - Consultoria e Pavimentação Leticia Antônia Oliveira Encarregado Laboratório ----- Enc. de Laboratório	 Teccon S/A - Consultoria e Pavimentação Jorge Augusto S. de Andrade Engenheiro Civil - CREA - 14173/D-GO ----- Engenheiro
---	--

Fonte: Teccon Engenharia (2021).

A Figura 2 a seguir apresenta o ligante CAP 50/70 já em estado líquido à 140°C,

previamente processo de execução das misturas.

Figura 2: Ligante CAP 50/70.



Fonte: Autoria própria.

3.2. Caracterização dos Agregados

O agregado influencia bastante no desempenho da mistura, ele corresponde a 95% do peso total do asfalto e é o principal responsável por suportar o impacto das cargas no asfalto. Devido ao seu impacto direto na qualidade da mistura, a escolha do mesmo deve atender não só características quanto ao suporte, mas para se tornar viável deve ser levado em consideração seu valor, sua disposição quanto a região, questões geométricas e químicas, que posteriormente irão influenciar no desempenho e funcionalidade do composto.

Para o desenvolvimento do presente projeto, foram adotados como agregados pétreos britas 01 e 00, pó de brita ou pedrisco, além do uso de filler filito, conforme a figura 3. Os materiais são de origem granítica e foram coletados in loco na pedreira Gramprata. A escolha dos materiais citados anteriormente se baseiam na disponibilidade de material da região, critérios econômicos, histórico de desempenho

e por fim questões granulométricas, visando atender as especificações da faixa C do DNIT além de ter componentes de todos os tamanhos, o que diminui o teor de vazios da mistura. A seguir é apresentado o Quadro 4 referente as faixas granulométricas do DNIT.

Quadro 4: Faixas Granulométricas do DNIT

Peneira de malha quadrada		% em massa, passante			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 - 100	100	-	±7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	±7%
¾"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	±7%
½"	12,7	-	-	80 - 100	±7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	±7%
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	±5%
Nº 10	2	20 - 40	20 - 45	22 - 50	±5%
Nº 40	0,42	out/30	out/32	ago/26	±5%
Nº 80	0,18	mai/20	ago/20	abr/16	±3%
Nº 200	0,075	01/ago	03/ago	02/out	±2%
Asfalto solúvel		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	±0,3%

Fonte: Adaptado Norma DNIT 031/2004 – ES.

Figura 3: Agregados utilizados.



Fonte: Autoria própria.

As características dos agregados que foram obtidas em laboratório são:

granulometria, adesividade aos produtos asfálticos, massa específica aparente, forma e absorção de água. De maneira divergente ao ligante, os ensaios e caracterizações serão realizados na UFT em Palmas.

3.2.1. Granulometria

De início para a realização do ensaio deve-se atender a norma DNER-ME 083/98 o qual determina a amostra mínima a ser usada. Entretanto foram adotados valores superiores para melhor qualidade dos resultados. As quantidades de Brita 01, Brita 00 e pó de pedra foram respectivamente 7kg, 5kg e 5kg. Ressalta-se que o valor do diâmetro máximo dos agregados fora fornecido pela Pedreira fornecedora do material. Segue abaixo o quadro 4, com valores mínimos.

Quadro 5: Massa mínima por amostra de ensaio

Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Massa mínima da amostra de ensaio (kg)
Agregados miúdos:	
4,8	1
Agregados graúdos:	
9,5	5
19	7
25	10
38	15
50	20

Fonte: Adaptado Norma DNER-ME 083/98.

Após a separação da quantidade de amostras, o material foi levado a estufa à temperatura de 105 °C durante 24 horas. Em seguida foi determinada a série de peneiras a serem utilizadas. Conforme a norma existem duas séries, a série normal e a série intermediária, para uma melhor execução do ensaio optou-se por utilizar elementos de ambas as séries. Sendo assim as peneiras escolhidas para o ensaio foram: ¾", ½", 3/8", N°4, N° 10, N° 40, N° 80 e N°200. A seguir o quadro 6 referente a abertura das peneiras utilizadas.

Quadro 6: Peneiras utilizadas conforme série.

Peneira	Abertura (mm)
3/4"	19
1/2"	12,5
3/8"	9,5
4	4,75
10	2
40	0,425
80	0,18
200	0,075

Fonte: Autoria própria.

Em seguida o material seco e separado é disposto pouco a pouco no topo da sequência de peneiras mais fundo, posteriormente a coleção o material é submetido a vibração por um agitador mecânico por um tempo de 10 minutos. A figura a seguir apresenta o agitador mecânico utilizado para separação adequada dos materiais conforme cada fração determinada no estudo.

Figura 4: Agitador mecânico.



Fonte: Autoria própria.

A posteriori deve-se pesar o material retido em cada peneira e calcula-se a porcentagem passante de amostra em cada peneira utilizada. Realizadas as pesagens, têm-se todos requisitos para a geração da curva granulométrica.

3.2.2. Índice de forma

Inicia-se o ensaio separando a quantidade mínima de material para ensaio, lembrando sempre de atender as Normas NBR NM 26 e NBR NM 27. No presente estudo foi adotado para a brita 01 um total de 7 kg (2 Kg acima do mínimo) e 5 kg para a brita 00.

Quadro 7: Massa mínima por amostra de ensaio

Fração granulométrica (abertura da peneira)	Massa mínima da amostra inicial (kg)
≤ 19 mm	5
> 19 mm e ≤ 25 mm	10
> 25 mm e ≤ 37,5 mm	15
> 37,5 mm	20

Fonte: Adaptado Norma NBR NM 26 e NBR NM 27.

Após a determinação da amostra mínima, deve-se separar as porcentagens retidas nas peneiras $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{8}$ " de cada brita, e caso os valores percentuais sejam inferiores a 5% da peso total da amostra, estas peneiras serão descartadas. Com base na porcentagem passante das peneiras, proporcionalmente o operador irá separar britas de cada peneira não descartada, sendo que o total de britas a serem medidas, tanto da brita 00 como da brita 01, é de 200 unidades.

Em sequência serão medidas brita a brita os valores de espessura e comprimento. Por fim é realizada uma média ponderada da razão entre comprimento e espessuras medidos para cada granulometria.

A figura a seguir registra a execução de aferição de medidas tanto de comprimento quanto de espessura do agregado.

Figura 5: Medição do comprimento da brita.



Fonte: Autoria própria.

3.2.3. Densidade e absorção

Para o ensaio de densidade e absorção levou-se em consideração duas normativas diferentes, este fato ocorre devido as normas especificarem o agregado quanto ao seu tamanho, sendo assim para agregados miúdos executou-se o ensaio conforme DNER-ME 194/98 e para agregados graúdos utilizou-se

3.2.3.1. Agregado miúdo

Com relação aos agregados miúdos, não foram realizados ensaios para o filler utilizado, sendo usado dados fornecidos pelo fabricante. Já o pó de pedra foi possível determinar a sua massa específica aparente através do frasco Chapman. Para o ensaio devem ser separados 500 gramas de pó de brita conforme DNER-ME 194/98. A seguir está apresentado o Frasco Chapman.

Figura 6: Frasco Chapman.



Fonte: Autoria própria.

A amostra deve estar previamente seca, inicia-se inserindo 200 cm³ de água destilada no frasco Chapman, posteriormente o agregado miúdo deverá ser adicionado lentamente com o auxílio de funil ou semalhante (Figura 7). A medida que o agregado é adicionado o frasco deverá sofrer leves agitações a fim de se remover bolhas de ar. Por fim é observado no frasco a leitura do nível da água e calculada sua densidade. Ressalta-se que o procedimento acontecerá duas vezes e que em caso de variação dos resultados maior que 0,05. A seguir conforme a fórmula 1 utilizada para o cálculo.

- Fórmula 1 - Densidade aparente (D_a)

$$D_a = \frac{500}{L_n - 200}$$

Onde:

L_n = Leitura do nível.

Figura 7: Ensaio de densidade do Pó de Pedra.



Fonte: Autoria própria.

3.2.3.2. Agregado gráudo

Na etapa dos agregados gráudos, além da necessidade de se adotar uma nova metodologia para o cálculo de densidade aparente é possível determinar a absorção do material, de acordo com a NM 53:2009, sendo gerados resultados tanto para a brita 00 como a brita 01.

Na parte referente a densidade aparente foram utilizados 7Kg de brita 01 e 5 Kg de brita 00, sempre atendendo os valores mínimos exigidos pela já comentada norma DNER-ME 083/98. A seguir são realizadas pesagens das amostras tanto secas em estufa por um período de 24 horas, como submersas com o auxílio de uma balança hidrostática, e bem como saturadas, sendo secas levemente com a utilização de um pano. A partir dos resultados das pesagens é possível realizar os cálculos para a determinação da massa específica aparente, a fórmula 2 consta a seguir:

- Fórmula 2 - Densidade aparente (D_a)

$$Da = \frac{m}{m_s - m_{sub}}$$

Onde:

m_s = Massa ao ar saturada com superfície seca (g);

m_{sub} = Massa submersa (g);

m = Massa ao ar seca (g).

A figura a seguir apresenta o processo de secagem das britas para posterior pesagem saturada da mesma.

Figura 8: Secagem leve da amostra para pesagem saturada.



Fonte: Autoria própria.

Com relação a absorção, esta é regida pela mesma normativa e seu cálculo é

derivado dos resultados obtidos nas pesagens acima, sendo utilizada a seguinte fórmula:

- Fórmula 3 - Absorção (A)

$$A = \frac{m_s - m}{m} \cdot 100$$

Onde:

m_s = Massa ao ar saturada com superfície seca (g);

m = Massa ao ar seca (g).

3.2.4. Adesividade

Para o ensaio de adesividade ao ligante betuminoso utiliza-se 500 gramas de agregado graúdo retido na peneira 1/2", o material passará pelo processo de lavagem, conforme a figura 9, durante 1 minuto em água destilada . Após a lavagem a amostra segue para estufa a 120 °C por um período de duas horas.

Figura 9: Lavagem de amostra.



Fonte: Autoria própria.

Na sequência adiciona-se 17,5 gramas de ligante ao agregado e inicia-se o

processo de mistura. A amostra deverá ser disposta em um bequer e ficar coberta com água destilada, logo após adiciona a água a amostra segue para a estufa durante 72 horas a 40°C. Após as 72 horas, avalia-se a amostra, em caso de deslocamento de película conclui-se que o ensaio foi não reagente, ou seja, não possui adesividade. Drena-se a água e avalia-se novamente a amostra checando novamente o deslocamento da película, havendo novamente recomenda-se a inserção de algum aditivo, e caso não haja deslocamento conclui-se que há adesividade entre o agregado e o ligante. A figura 10 a seguir apresenta-se as misturas já executadas, com 4 teores de fibras diferentes, após a imersão em água destilada para posteriormente ser encaminhada para estufa durante 3 dias.

Figura 10: Ensaio de adesividade.



Fonte: Autoria própria.

3.3. Caracterização das Fibras

Para a realização do projeto adotou-se o uso de duas tipologias de fibras fornecidas pela FORTA® Corporation, as quais foram desenvolvidas prioritariamente para utilização em composições asfálticas, estas se caracterizam conforme a tabela abaixo.

Quadro 8: Características das fibras.

Caractéristiques	Polipropileno	Aramida
Forma	Fibra multifilamento torcida	Fibra monofilamento
Densidade relativa	0,91	1,45
Resistência a tração	483	3000
Comprimento (mm)	19	19
Cor	Cinza	Amarela
Resistência a ácido/álcalis	Inerte	Inerte
Temperatura de derretimento (°C)	157	450

Fonte: FORTA® Corporation.

Figura 11: Fibras de polipropileno e aramida.



Fonte: Autoria Própria.

As fibras se encontram misturadas de forma aleatória, sendo que sua proporção indicada corresponde a 14% de fibras de aramida e 86% de fibras de polipropileno (havendo a possibilidade de variação), tendo ambas um comprimento de 19mm. Com relação as fibras de aramida, se destaca o fato de possuírem alta resistência a tração, buscando assim melhoras no comportamento de fadiga e deformação permanente da mistura asfáltica. Já as fibras de polipropileno são incorporadas ao ligante durante o período de misturam, tornando-se assim um fator modificante do cimento asfáltico.

Figura 12: Fibras utilizadas no projeto.



Fonte: Souza (2010).

A fibra de aramida possui coloração amarelada, enquanto as fibras de polipropileno se caracterizam por uma cor mais forte, próxima ao marrom. Sobre a questão do quantitativo de cada fibra e outras especificações adotadas, tem-se por referência os trabalhos desenvolvidos por Mello et al. (2008) e Souza (2010), ressaltando-se que o presente projeto visa dar sequência a esta linha de pesquisa referente a matriz compósitos.

Como o intuito do presente estudo não é aprofundar o conhecimento sobre as fibras utilizadas de maneira isolada, ganhando destaque seus impactos nas misturas asfálticas quentes. Sendo assim foram avaliados pontos tratados por Souza (2010), visto que na sua dissertação de mestrado foi utilizada a mesma fibra.

Segundo Souza (2010) têm-se a análise termogravimétrica como parâmetro de avaliação da fibra, pois esta é a responsável por medir variações de massa de uma amostra em consequência de transformações químicas ou físicas. Basicamente sua importância é ocasionada devido a possibilidade da fibra modificar sua estrutura química, perdendo suas características de reforço, ou até mesmo pela perda de massa ao evaporar, implicando em perdas diretas na questão de viabilidade do uso da fibra.

Souza (2010) constatou em seu estudo que apesar de sua mistura oscilar sua temperatura entre 144° C e 168° C a fibra de aramida com polipropileno manteve sua estrutura estável, sendo averiguado que apenas para temperaturas excessivamente maiores que a de trabalho é que as fibras iniciam o processo de degradação. Mais

detalhadamente segundo Souza (2010) as fibras de aramida e polipropileno respectivamente iniciam sua instabilidade estrutural nas marcas de 579,55° C e 400,51° C em ensaios realizados em atmosfera inerte.

Assim sendo, devido as temperaturas de trabalho se assemelharem, é possível concluir que as fibras de polipropileno e aramida no presente estudo se mantêm estáveis durante o processo de execução da mistura, não perdendo então sua massa ou características de reforço.

3.4. Dosagem e execução da mistura

Esta etapa se inicia logo após a obtenção dos resultados da caracterização de todos os materiais envolvidos e tem como base a metodologia *Marshall*. Primeiramente são preparados 15 corpos de prova (Figura 14), sendo 05 grupos contendo 03 corpos de prova semelhantes, cada grupo contemplará um teor de ligante diferente conforme dosagem específica, sendo eles 4,5%; 5,0%; 5,5%; 6,0% e 6,5 %, variando sempre 0,5 % entre os teores.

Posteriormente calcula-se os parâmetros Marshall e determina-se teor ótimo a partir dos teores iniciais, sendo usados dados de pesagens secas, submersas e saturadas , ressalta-se que os parâmetros determinados pelo DNER de volume de vazios devem ser respeitados. Após descobrimento do teor de ligante ideal, foram moldados 03 corpos de prova para a determinação da estabilidade e fluência, em seguida mais 3 corpos foram moldados para realização do ensaio de resistência a tração por compressão diametral o qual é regido pela NORMA DNIT 136/2018 – ME, sendo assim encerra-se a etapa de produção de corpos de prova sem a adiação de fibras.

Figura 13: Amostras compactadas iniciais sem fibra.



Fonte: Autoria própria.

Com o teor de projeto já calculado (5 %), deve-se determinar os teores de fibra a serem utilizados. Segundo o fabricante o ideal corresponde a 445 gramas de fibra por tonelada de mistura, que em porcentagem representa 0,0445 devido o estudo trabalhar com valores de mistura bem inferiores, para melhor aplicação e facilidade optou-se por arredondar a porcentagem utilizada para 0,05 %. A partir da simplificação optou-se por utilizar o valor de 0,05 % como teor médio, isto implica para uma mistura de 1200 gramas em uma quantidade de fibra de 0,6 gramas. Para teor ótimo de 5 % de ligante utiliza-se 60 gramas de CAP 50/70, sendo assim 0,6 gramas de fibra corresponde a 1 % de 60 gramas de ligante. Por fim conclui-se que o teor médio é igual a 1 % do peso do ligante, restando apenas determinar valores acima e abaixo do teores de fibra, sendo adotados por opção própria os valores de 0,5 % e 1,5 % de fibra em referência ao ligante, os valores correspondem respectivamente a 0,3 e 0,9 gramas de fibra.

Já na parte de misturas com fibras, serão feitos 18 corpos de prova com 03

teores diferentes de fibra, sendo assim serão moldados 06 corpos de prova para cada teor, 03 utilizados nos ensaios de estabilidade e fluência e outros 03 nos ensaios de resistência a tração por compressão diametral. Por fim conclui-se que devem ser elaborados 36 corpos de prova.

Para a execução dos corpos de prova foi utilizado panela ou forma semelhante para deposição dos elementos, sendo esta preaquecida com auxílio de um fogareiro, posteriormente foi introduzido o ligante para aquecimento até 150°C (Faixa permitida de 107°C a 175°C). Na sequência os agregados deverão ser preparados, ou seja, separados em recipientes nas quantidades previamente determinadas, indo estes para a estufa cerca de 160°C (Faixa permitida de 10°C a 15°C acima da temperatura do ligante. Depois do ligante e agregado ambos atingirem as temperaturas aguardadas, estes serão misturados no recipiente o qual contém o ligante, juntamente com a fibra, sendo misturados até o incorporamento completo do agregado e fibras ao ligante. Então coloca-se a mistura nos moldes que já devem estar higienizados e preaquecidos a temperatura equivalente a 130°C, sendo necessário a realização de compactação manual com martelo de 4,54 Kg e 98,4 mm de diâmetro, vale ressaltar que a compactação deverá ocorrer por um único operador. Por fim, aguarda-se a mistura descansar por um período aproximado de 24 horas.

A figura em sequência indica a estufa em funcionamento contendo o material já pré-aquecido para a execução das misturas asfálticas.

Figura 14: Estufa pré-preparada para compactação.



Fonte: Autoria própria.

A figura a seguir apresenta o controle de temperatura realizado para iniciar o

processo de mistura de materiais.

Figura 15: Acompanhamento do ligante previamente execução de misturas.



Fonte: Autoria própria.

A gravura apresenta o material já homogêneo na panela, sendo transferido para o molde para posterior compactação.

Figura 16: Execução da mistura.



Fonte: Autoria própria.

A próxima figura demonstra o maquinário utilizado para execução da

compactação Marshall.

Figura 17: Compactador Marshall.



Fonte: Autoria própria.

3.5. Caracterização da mistura

3.5.1. Rice Test

O Rice Test é um ensaio capaz de determinar a Massa Específica Teórica Máxima (Gmm) e Densidade da Mistura Asfáltica Quente não compactadas, sua principal vantagem é que o mesmo apresenta um grau de precisão maior do que outros procedimentos.

Devido a qualidade do ensaio, o mesmo foi realizado no presente estudo para servir de comprovação dos dados obtidos por outra metodologia. Sua importância se dá pelo fato de que são essenciais nos cálculos de volume de vazios das misturas asfálticas quentes.

No ensaio executado, uma amostra da mistura, conforme a figura 18, sem estar

compactada é disposta em um frasco com peso conhecido, a seguir se adiciona água até cobrir a amostra e aplicado ao vácuo por 15 minutos. Em sequência deve-se calcular o volume da amostra ao se encher completamente o frasco de água e pesando o ar. Ressalta-se que o ensaio deverá ocorrer com água de 25°C, sendo submetido a correções ao se constatar valores diferentes. A seguir é apresentado a equação referente ao Rice Test.

- Fórmula 4 - Massa específica máxima teórica (Gmm)

$$Gmm = \frac{A}{A+F-G} \cdot f \cdot dw$$

Onde:

A = Massa da amostra, seca em estufa, ao ar (g);

F = Massa do picnômetro cheio de água à temperatura do ensaio (g);

G = Massa do picnômetro cheio com amostra e água (g);

f = Fator de multiplicação (1).

dw = Densidade da água à temperatura do ensaio (mg/m³)

Figura 18: Preparação de amostra não compactada.



Fonte: Autoria própria.

Figura 19: Equipamento Rice Test.



Fonte: Autoria própria.

3.5.2. Parâmetros Marshall

Com os corpos de prova já compactados é realizada a determinação dos parâmetros Marshall. Primeiro deve-se pesar cada corpo de prova seco, após a pesagem mede-se a altura e diâmetro (figura 22) de cada corpo de prova, foram executadas 4 leituras de altura e diâmetro do corpo de prova para na sequência calcular-se a média entre os valores para se obter a altura e diâmetro real dos corpos de prova. As medidas de altura e diâmetro foram retirados de pontos diferentes da amostra, buscando sempre equidade na distância entre os locais medidos.

Figura 20: Leitura de altura e diâmetro dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

A próxima fase é a pesagem dos corpos de prova, são realizadas pesagens secas, submersas e saturadas. Para a realização da pesagem submersa é necessário o uso de uma balança hidrostática, que receberá corpos de prova imersos em água em um período mínimo de 24 horas.

Figura 21: Pesagem submersa de amostra.



Fonte: Autoria própria.

Em sequência ocorreu a pesagem saturada, sendo importante que os corpos de prova passem por uma secagem superficial suave com auxílio de um pano antes da sua pesagem, além disso destaca-se que os corpos de prova devem estar armazenados submersos em água, evitando exposição ao ar livre até o momento do processo de pesagem.

Figura 22: Secagem leve de amostra saturada em sua pré-pesagem.



Fonte: Autoria própria.

Na próxima etapa os corpos de prova seguem para o banho Maria totalmente imersos na água destilada com temperatura de 60°C durante 30 a 40 minutos. A figura 23 a seguir, indica o instrumento utilizado para produção de água destilada no laboratório (destilador).

Figura 23: Destilador do LEGI.



Fonte: Autoria própria.

A figura 24 apresentada a seguir, indica o maquinário utilizado para execução do banho maria, o mesmo é responsável por fazer o controle automático da temperatura e assegurar que os corpos de prova se mantenham a uma temperatura de 60°C.

Figura 24: Corpos de prova em banho maria.



Fonte: Autoria própria.

Posteriormente cada amostra deve ser inserida em um molde de compressão já pré aquecido a 60° C e posicionado na prensa mecânica com a agulha ajustada para ensaio.

Inicia-se o mecanismo da prensa (figura 25), nela consta o registro do tempo, deslocamento e carga exercida pela prensa até o instante de rompimento da amostra finalizando o processo de leitura de dados.

Ressalta-se que os dados obtidos ainda deverão ser tratados conforme a DNER ME 043/95, que informa que os valores obtidos deverão ser corrigidos conforme a espessura dos corpos de prova. A seguir consta o quadro referência para ajuste dos valores.

Quadro 9: Correção da Estabilidade, pela espessura do corpo de prova.

Espessura (mm)	Fator	Espessura (mm)	Fator	Espessura (mm)	Fator
50,8	1,47	56,3	1,22	64,3	0,98
51	1,45	56,6	1,21	64,7	0,97
51,2	1,44	56,8	1,20	65,1	0,96
51,6	1,43	57,12	1,19	65,6	0,95
51,8	1,42	57,4	1,18	66,1	0,94
52	1,41	57,7	1,17	66,7	0,93
52,2	1,40	58,1	1,16	67,1	0,92
52,4	1,39	58,4	1,15	67,5	0,91
52,6	1,38	58,7	1,14	67,9	0,90
52,9	1,37	59,0	1,13	68,3	0,89
53,1	1,36	59,3	1,12	68,8	0,88
53,3	1,35	59,7	1,11	69,3	0,87
53,5	1,34	60,0	1,10	69,9	0,86
53,8	1,33	60,3	1,09	70,3	0,85
54	1,32	60,6	1,08	70,8	0,84
54,2	1,31	60,9	1,07	71,4	0,83
54,5	1,30	61,1	1,06	72,2	0,82
54,7	1,29	61,4	1,05	73,0	0,81
54,9	1,28	61,9	1,04	73,5	0,80
55,1	1,27	62,3	1,03	74,0	0,79
55,4	1,26	62,7	1,02	74,6	0,78
55,6	1,25	63,1	1,01	75,4	0,77
55,8	1,24	63,5	1,00	76,2	0,76
56,1	1,23	63,9	0,99		

Fonte: DNER ME 043/95 adaptado.

Figura 25: Rompimento de amostra.



Fonte: Autoria própria.

Por fim, resta-se calcular os parâmetros Marshall de acordo com os dados coletados. Basicamente são calculados 06 parâmetros, são eles: massa específica aparente (G_{mb}), massa específica máxima (G_{mm}), volume de vazios (V_v), vazios com betume (V_{CB}), vazios do agregado mineral (V_{AM}), relação betume/ vazios (RBV). Em seguida estão dispostas as fórmulas empregadas para a obtenção dos resultados finais.

- Fórmula 5 - Massa específica aparente (G_{mb})

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_{sat} - M_{sub}} \cdot 0,9971$$

Onde:

M_s = massa do corpo de prova seco (g);

M_{sat} = massa do corpo de prova com superfície saturada seca (g);

M_{sub} = massa seca do corpo de prova e posteriormente submerso (g);

G_{mb} = massa específica aparente (g/cm^3);

0,9971 = massa específica da água a 25 °C (g/cm^3).

- Fórmula 6 - Massa específica máxima (Gmm)

$$Gmm = \frac{100}{\frac{\%b_{01}}{d_{b_{01}}} + \frac{\%b_{00}}{d_{b_{00}}} + \frac{\%pó}{d_{pó}} + \frac{\%f}{d_f}}$$

Onde:

b01 = Brita 01;

b00 = Brita 00;

pó = Pó de pedra;

f = Filler.

- Fórmula 7 - Volume de vazios (Vv)

$$Vv(\%) = \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \cdot 100$$

Onde:

Gmm = Massa específica máxima;

Gmb = Massa específica aparente (g/cm³).

- Fórmula 8 - Vazios com betume (VCB)

$$VCB(\%) = \frac{Gmb \cdot \%a}{G_a}$$

Onde:

% a = porcentagem de asfalto, em relação à massa total da mistura asfáltica;

G_a = massa específica real do asfalto (g/cm³).

- Fórmula 9 - Vazios do agregado mineral (VAM)

$$VAM(\%) = Vv + VC$$

Onde:

Vv = Volume de vazios;

VC = Vazios preenchidos por betume.

- Fórmula 10 - Relação betume / vazios (RBV)

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

Onde:

VCB = Volume de vazios;

VAM = Vazios do agregado mineral.

3.5.3. Resistência a tração por compressão diametral

Para a realização do ensaio de resistência a tração por compressão diametral, deve-se primeiramente realizar quatro medições de altura referentes a cada corpo de prova, em seguida realiza-se as medições do diâmetro em pelo menos três posições diferentes.

Logo após a aferição das medidas de altura e diâmetro, é posicionado na prensa o molde para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral, apresentado de acordo com a figura 26.

Figura 26: Molde para ensaio de tração por compressão diametral.



Fonte: Autoria própria.

Por fim as amostras seguem para rompimento, levou-se em consideração que a velocidade de operação do equipamento deverá ser exatamente igual ao do ensaio Marshall, ou seja, 0,8 mm por segundo. Os valores finais deverão ser calculados de acordo com a seguinte fórmula:

- Fórmula 11 - Resistência á tração (R_t)

$$R_t(MPa) = \frac{2F}{100 \pi D H}$$

Onde:

F = Carga de ruptura (N);

D = Diâmetro da amostra (cm);

H = Altura da amostra (cm).

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Introdução

Nesta etapa são esclarecidos os resultados atingidos mediante a realização dos processos metodológicos mencionados no capítulo 3. A princípio são apresentados resultados referentes a morfologia e caracterização do agregado, e subsequentemente é exposto os resultados dos ensaios mecânicos realizados nas misturas sem fibras em que há variação no teor de ligante, até que se determine o teor ótimo de projeto. Por fim têm-se os resultados mecânicos em misturas com adição de fibras.

4.2. Resultados e análise da caracterização dos agregados

Neste tópico serão abordados os resultados dos ensaios para avaliar a morfologia do agregado pétreo, sabendo-se que seu desempenho influencia diretamente na qualidade do pavimento. De início fora realizado o ensaio de granulometria de todos os componentes, são eles: brita 01, brita 00, pó de pedra e filler. Posteriormente determinou-se o índice de forma pelo método do paquímetro e por fim sucedeu-se os ensaios de densidade e absorção dos agregados.

4.2.1. Granulometria

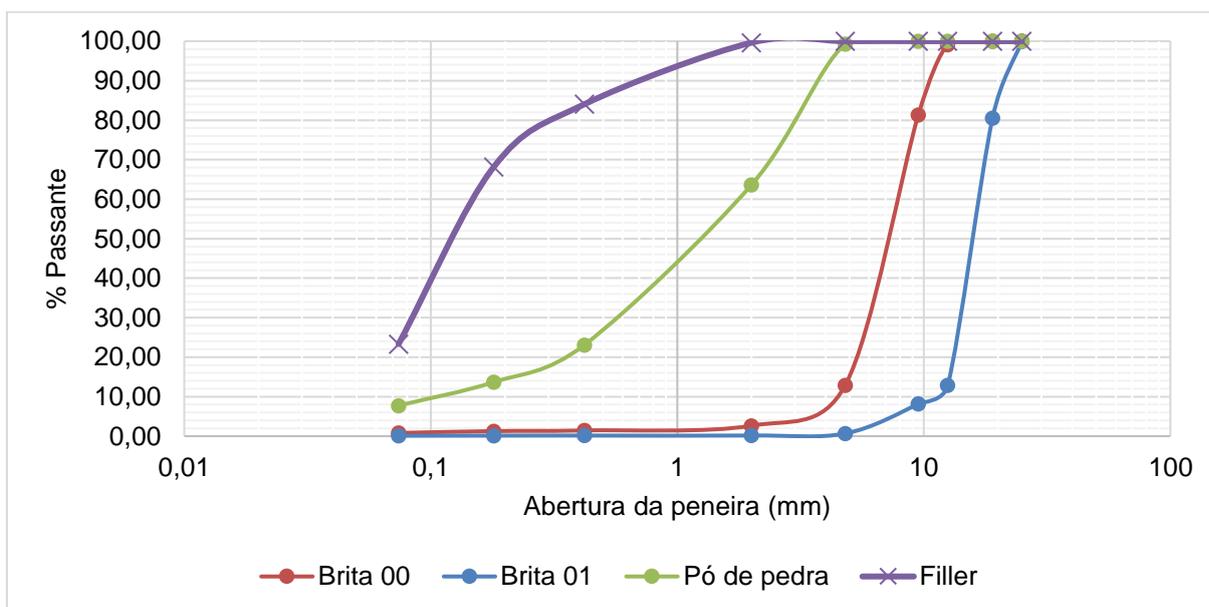
A granulometria é o ensaio fundamental para avaliação de qualquer agregado mineral, a divisão do agregado em diversos tamanhos possibilita sua distribuição graduada no pavimento, proporcionando melhoras no desempenho e economia no uso de ligante. O Quadro 10 e o Gráfico 1 indicam as composições e curvas granulométricas referentes a brita 00, brita 01, pó de pedra e filler que compõem o traço.

Quadro 10: Distribuição granulométrica dos agregados minerais.

Peneiras		Brita 01	Brita 00	Pó-de-pedra	Filler
(in)	(mm)	% Passante	% Passante	% Passante	% Passante
1"	25	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19	80,56	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,5	12,88	99,10	100,00	100,00
3/8"	9,5	8,17	81,36	100,00	100,00
Nº 4	4,8	0,68	12,92	99,31	100,00
Nº 10	2	0,16	2,65	63,65	99,63
Nº 40	0,42	0,15	1,45	23,11	84,05
Nº 80	0,18	0,14	1,28	13,69	68,15
Nº 200	0,074	0,10	0,81	7,74	23,32

Fonte: Autoria própria.

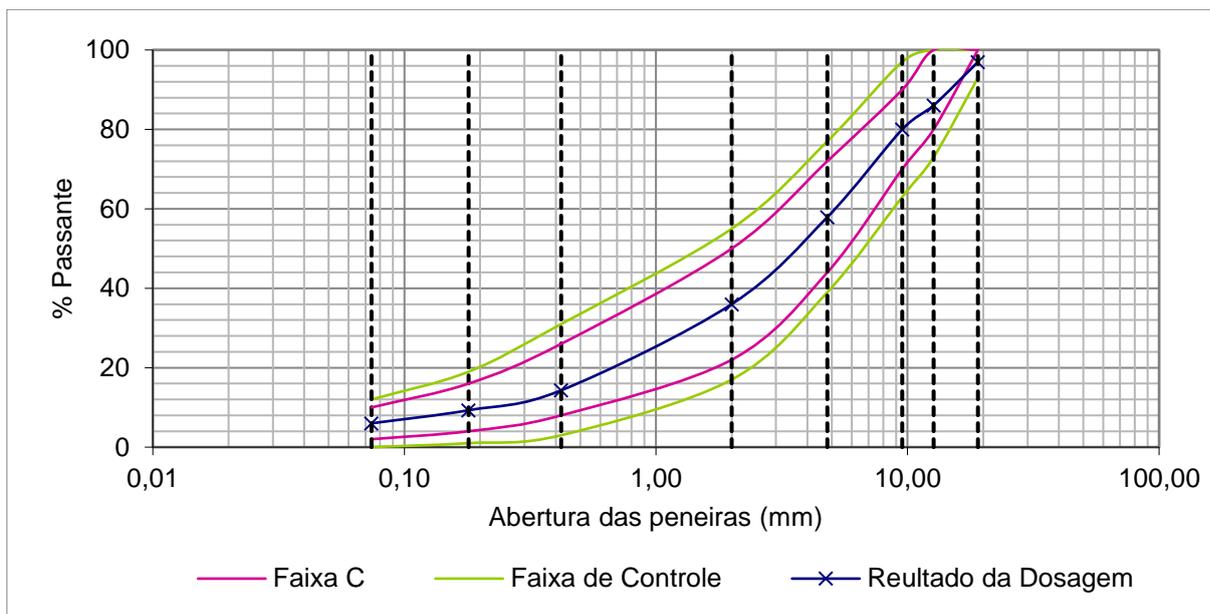
Gráfico 1: Curva Granulométrica dos agregados.



Fonte: Autoria própria.

Em misturas densas visa-se reduzir ao máximo o volume de vazios para que a impermeabilidade seja a maior possível, destaca-se que o volume acusado deve estar de acordo com a DNER ES 386/99. Segundo o gráfico gerado, observa-se que o pó-de-pedra se encontra bem graduado, pois o mesmo possui tanto frações grossas quanto finas, sendo essencial para uma ótima redução do volume de vazios.

Gráfico 2: Curva granulométrica referente a dosagem.



Fonte: Autoria própria.

Após os resultados obtidos com o ensaio de granulometria, foi possível realizar o traçado referente a dosagem obtida e constata-lo que o mesmo se encontra dentro da faixa de controle da faixa C do DNIT.

4.2.2. Densidade e absorção

A massa específica aparente e a absorção são propriedades de extrema importancia na pavimentação, esse fato se da pela necessidade do conhecimento dessas características do agregado para a determinação do teor de projeto (teor ótimo), o que irá permitir ao pavimento possuir maior qualidade e durabilidade.

Os valores obtidos referentes a este ensaio estão dispostos no quadro a seguir divididos em agregados graúdos, agregados miúdos e filler. Ressalta-se que os dados referentes ao filler foram fornecidos pelo fabricante.

Quadro 11: Resultado densidade e absorção dos agregados.

	Agregados graúdos (peneira 1/2" N° 4)		Agregados miúdos (peneira N° 10 a N° 200)	Filler (> N° 200)
	Brita 00	Brita 01	Pó de pedra	
Densidade (g/cm ³)	2,52	2,41	2,79	2,312
Absorção (%)	0,16	0,13	-	-

Fonte: Autoria própria.

4.2.3. Índice de forma

O índice de forma é uma das principais características do agregado, seu resultado impacta diretamente na qualidade do pavimento. Segundo o método do paquímetro foi inicialmente calculada a porcentagem retida nas peneiras $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{8}$ ". Sendo indicado no quadro abaixo o resultado obtido.

Quadro 12: Pesagem e % passante das peneiras $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{8}$ ".

Brita	Peso						Total (g)
	$\frac{3}{4}$ " (g)	$\frac{3}{4}$ " (%)	$\frac{1}{2}$ " (g)	$\frac{1}{2}$ " (%)	$\frac{3}{8}$ " (g)	$\frac{3}{8}$ " (%)	
01	1359,7	19,4	4732,4	67,7	329,4	4,7	6992,5
00	0	0	44,9	0,9	885,5	17,7	4992,5

*Dados em enrito indicam porcentagens abaixo de 5%, portanto não foram utilizados.

Fonte: Autoria própria.

Conforme o quadro acima apenas a granulometria $\frac{3}{8}$ " foi descartada para a brita 01, já para a brita 00 as peneira $\frac{3}{4}$ " e $\frac{1}{2}$ " foram descartadas.

Após descarte das faixas insignificantes, foi determinado por meio do cálculo da média ponderada, o número de britas a serem medidas conforme cada fração granulométrica. O resultado obtido está disposto no quadro 13.

Quadro 13: Número de grãos medidos conforme fração.

Brita	Fração	Nº de grãos
01	$\frac{3}{4}$ "	45
01	$\frac{1}{2}$ "	155
00	$\frac{3}{8}$ "	200

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os dados apresentados, observa-se que foram medidas 200 britas 00 referentes a fração $\frac{3}{8}$ ", 45 britas 01 a fração $\frac{3}{4}$ " e 155 britas 01 retidas na granulometria $\frac{1}{2}$ ". O próximo quadro apresenta o resultado final obtido após a realização das medidas.

Quadro 14: Resultado índice de forma.

	Brita 01		Brita 00
	3/4"	1/2"	3/8"
Índice de forma	0,51	0,56	0,56

Fonte: Autoria própria.

Avaliando o resultado apresentado, observa-se que o agregado está habilitado para uso em pavimentação, pois o mínimo exigido corresponde a 0,5. Entretanto os valores apresentados são longe dos ideais (valor ideal = 1), isso nos mostra que o agregado disponível na região possui características próximas aos limites mínimos de norma, implicando na redução da resistência da mistura e em casos práticos possui maiores chances de se quebrarem com as cargas provenientes do tráfego.

4.2.4. Adesividade

Adesividade é o fenômeno o qual se refere a quantidade de energia que é necessária para o rompimento da ligação existente entre o ligante (CAP 50/70) e o agregado. Devido a variedade de agregados encontrados na natureza passíveis de aplicação na pavimentação se faz necessário avaliar seu desempenho em aplicações práticas, e para isso, na engenharia civil utiliza-se uma avaliação qualitativa do seu desempenho.

Primeiramente deve-se esclarecer que existem duas tipologias de adesividade, ativa e passiva. A adesividade ativa ocorre quando o ligante cobre a partícula do agregado, sendo esta a condição fundamental para que o ligante envolva a superfície do agregado. Já a passiva corresponde a resistência ao deslocamento da película de CAP que já se encontra envolvida no agregado.

No presente estudo foram executados vários teores de CAP 50/70, tanto sem adição de fibra como com adição de diversos teores, sendo assim o principal foco do ensaio foi observar o comportamento de adesividade relacionado ao teor ótimo, sendo assim, foram realizados 04 ensaios de adesividade, o primeiro com 5% de ligante e sem adição de fibras, e os demais também com 5% de ligante, porém variando o teor de fibra nas faixas de 0,5%; 1,0% e 1,5%. A figura 27 a seguir mostra os resultados.

Figura 27: Resultado do ensaio de adesividade conforme teor de fibras.



Fonte: Autoria própria.

Conforme a DNER ME 78/1994 foram avaliadas as amostras, é possível se constatar com base na imagem acima que independente da adição de fibras ou não, o ligante CAP 50 / 70 utilizado no estudo possui uma adesividade satisfatória, não sendo encontrados pontos de deslocamento da camada superficial da película de ligante após as 72 horas. Sendo assim, para o agregado encontrado na região não existe a necessidade de se aditivar a mistura asfáltica a fim de que se melhore o desempenho quanto a adesividade.

4.3. Resultados e análises das misturas

4.3.1. Rice test

Os resultados obtidos através do Rice Test demonstraram estar de acordo com o esperado. Durante o estudo calculou-se a massa específica teórica máxima por duas metodologias, sendo adotados os valores finas da metodologia apresentada mais a frente. Sendo assim os resultados do Rice Test servem apenas de embasamento. A seguir se apresenta o quadro geral dos valores utilizados no ensaio.

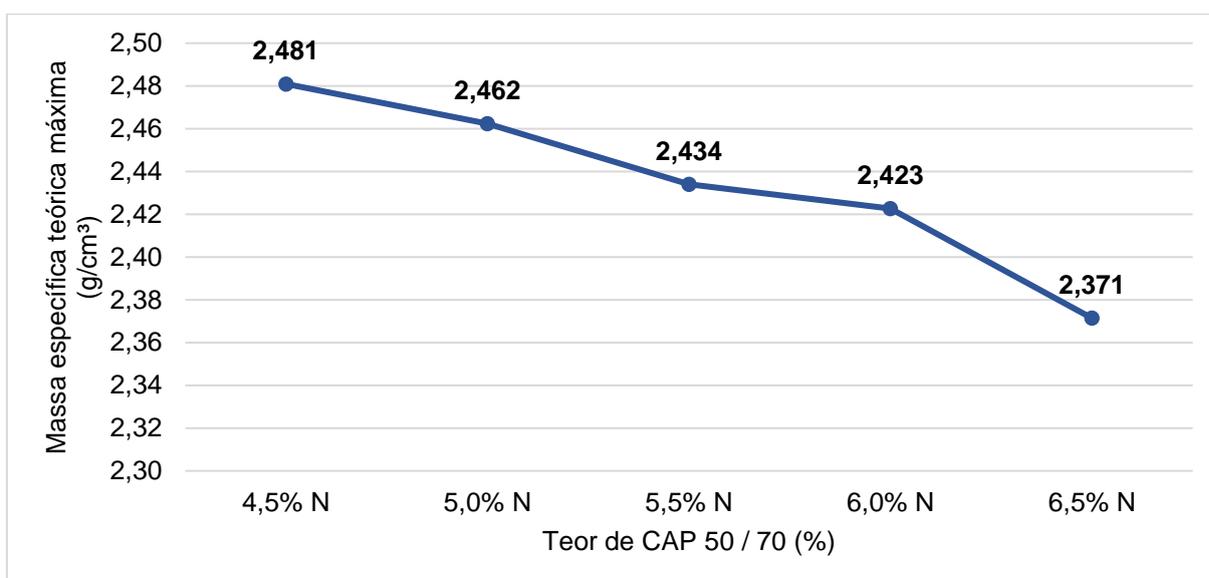
Quadro 15: Medidas e resultados Rice Test.

Teores de CAP 50/70

	4,5 % N	5,0 % N	5,5 % N	6,0 % N	6,5 % N
Massa do frasco + placa + amostra (g)	3591,6	3590,8	3591,5	3586,1	3592,6
Massa do frasco + placa + água (g)	3738,0	3738,0	3738,0	3738,0	3738,0
Massa da amostra (g)	1995,4	1994,6	1995,3	1989,9	1996,4
Massa do frasco + placa + água + amostra (g)	4931,5	4922,5	4913,5	4906,5	4892,5
Temperatura (°C)	25	25	25	25	25
Fator de multiplicação	1	1	1	1	1
Densidade máxima da mistura asfáltica (G_{mm}) (g/cm^3)	2,481	2,462	2,434	2,423	2,371

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 2: Curva da massa específica máxima teórica conforme Rice Test.



Fonte: Autoria própria.

Conforme o gráfico apresentado, nota-se uma pequena oscilação no valor correspondente ao teor 6,0 %, apesar da oscilação os dados obtidos, estes se apresentam em conformidade com o esperado.

4.3.2. Parâmetros Marshall

Para a obtenção dos parâmetros Marshall foram executados, conforme previsto

na metodologia do presente estudo, 15 corpos de prova sem adição de fibras para a determinação do teor ótimo.

Ressalta-se que foram utilizados 3 corpos de prova para cada teor. Após a compactação e resfriamento dos 15 corpos de prova, os mesmos foram desmoldados e submedidos a uma bateria de medias.

Primeiramente cada corpo de prova teve sua altura e diâmetro medidos 04 vezes. Em seguida as amostras foram pesadas de 03 maneiras diferentes, sendo elas: pesagem seca ao ar livre, pesagem submersa e pesagem saturada com superfície seca.

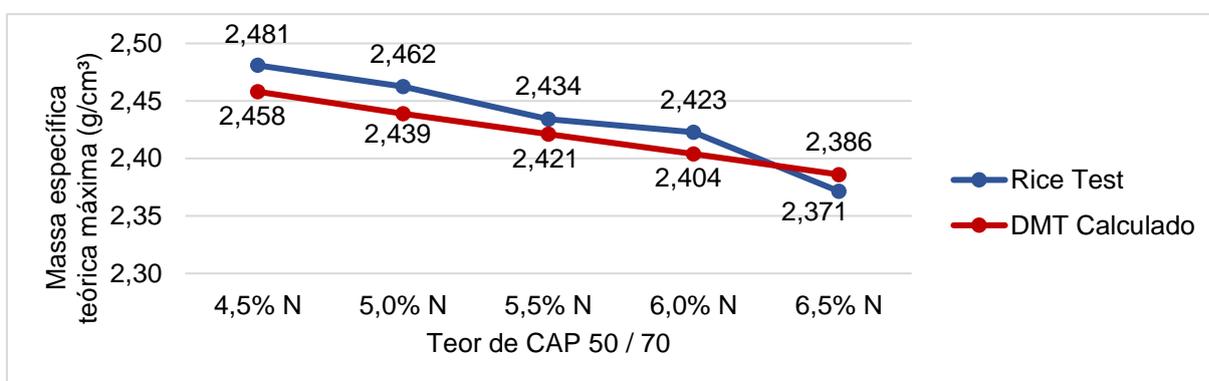
Depois de medidos e pesados, cada corpo de prova teve sua densidade aparente calculada. Logo após medida sua massa específica individual, foram calculados por teor a massa específica máxima teórica, após o cálculo seus valores foram comparados ao resultados do Rice Test, conforme o quadro 17, para atestamento dos resultados obtidos.

Quadro 16: Medidas e resultados de DMT e GMM obtida pelo Rice Test.

Ensaio	Teores de CAP 50/70				
	4,5 % N	5,0 % N	5,5 % N	6,0 % N	6,5 % N
DMT por ponderação (g/m ³)	2,458	2,439	2,421	2,404	2,386
Rice Test (g/m ³)	2,481	2,462	2,434	2,423	2,371

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 3: Comparativo dos resultados da massa específica máxima (DMT).



Fonte: Autoria própria.

Em seguida com os valores das densidades aparentes das amostras e da densidade máxima teórica determinou-se o volume de vazios de cada corpo de prova.

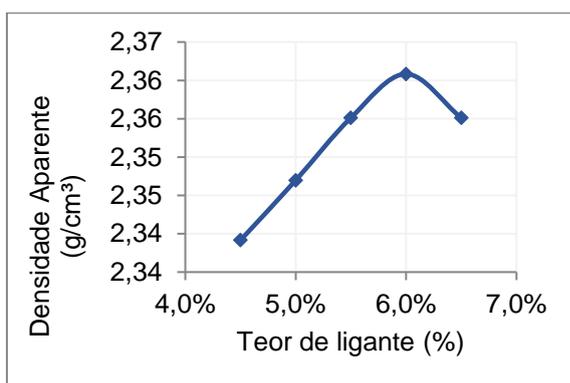
Por fim foram determinados através dos cálculos três parâmetros restantes. São eles: vazios com betume, vazios do agregado mineral e relação betume / vazios. A seguir no quadro 18 são apresentados os valores obtidos a partir das médias calculadas de cada teor de ligante e também a curva referente a cada parâmetro.

Quadro 17: Medidas e parâmetros Marshall.

Teor	ϕ (cm)	h (cm)	da (g/cm ³)	DMT	Vv (%)	VCB	VAM	RBV
6,5%	10,16	6,23	2,36	2,39	1,30	15,16	16,46	92,10
6,0%	10,17	6,31	2,36	2,40	1,78	14,02	15,80	88,77
5,5%	10,17	6,25	2,36	2,42	2,74	12,82	15,56	82,44
5,0%	10,17	6,38	2,35	2,44	3,79	11,62	15,41	75,41
4,5%	10,16	6,52	2,34	2,46	4,82	10,42	15,25	68,38

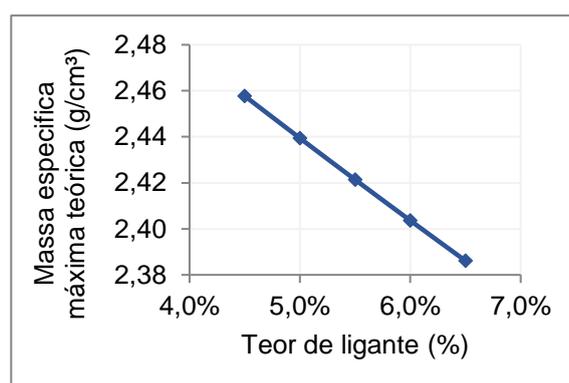
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 4: Densidade aparente



Fonte: Autoria própria.

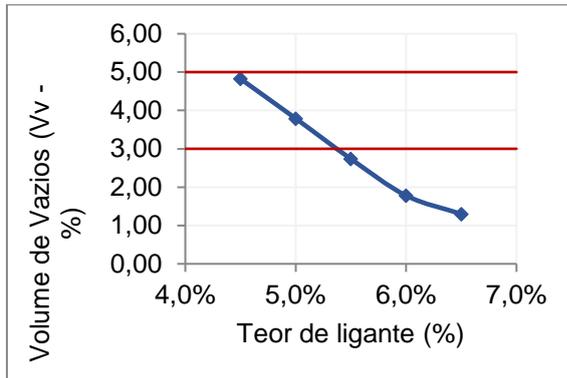
Gráfico 5: Massa específica máxima teórica



Fonte: Autoria própria.

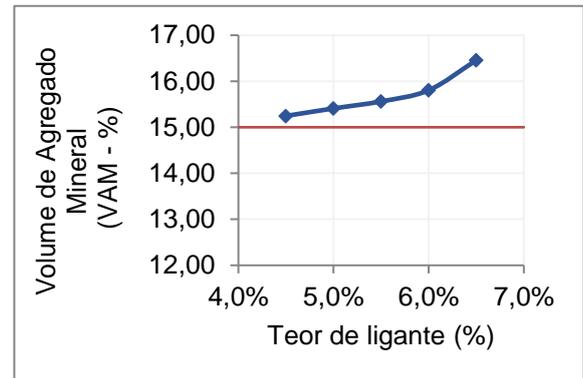
Ao se observar o índice de vazios, percebe-se que o uso de mais de 5% de CAP 50/70 na mistura faz com que o volume de vazios diminua abaixo do mínimo estipulado por Norma, conforme o Gráfico 6, tornando assim qualquer teor acima de 5% inapto para aplicações.

Gráfico 6: Volume de vazios



*Linhas horizontais correspondem aos valores
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 7: Volume de agregado mineral

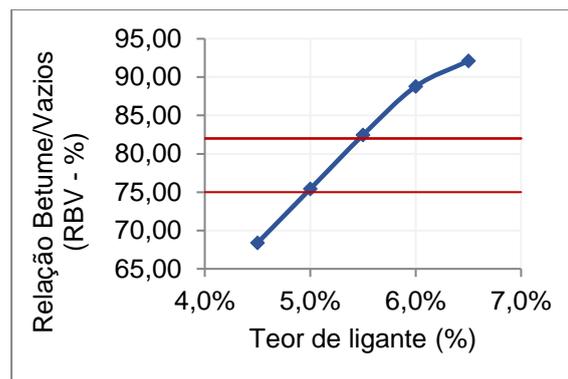


*Linha horizontal corresponde ao valor mínimo estabelecido por norma.

Ao analisar o gráfico 7, que apresenta os valores do volume de agregado mineral, é notório que todas as faixas atendem as normativas mínimas determinadas pelo DNER, sendo assim, este não se apresenta como fator crucial para determinação do teor de ligante ótimo.

De forma análoga, pode-se concluir com o Gráfico 8, que apenas o teor de 5 % de ligante se enquadra na faixa adequada para aplicação, o que restringe a apenas uma categoria apta para uso, sendo assim automaticamente deve-se priorizar como teor de projeto misturas com 5 % de CAP.

Gráfico 8: Relação betume / vazios



*Linhas vermelhas correspondem aos valores máximos e mínimos estabelecidos por norma.

Fonte: Autoria própria.

Por fim, iniciou-se o processo para determinação do último parâmetro Marshall, que é a Estabilidade Marshall. Para a obtenção dos resultados foi necessário o rompimento na prensa dos corpos de prova tanto com fibras como sem adição de fibras.

De acordo com o gráfico 9, os resultados apresentados é possível concluir que o teor de 5,5 % de ligante se apresenta mais estável, suportando a maior média de carga.

Gráfico 9: Estabilidade Marshall sem fibras.

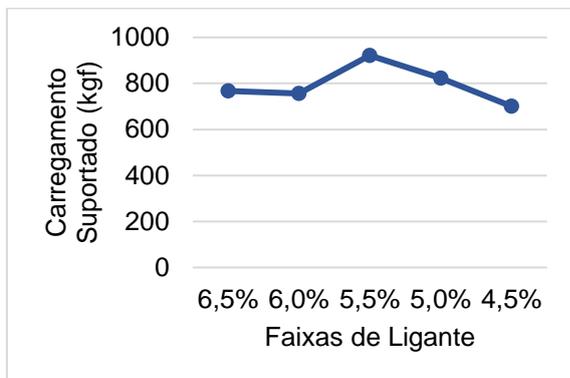
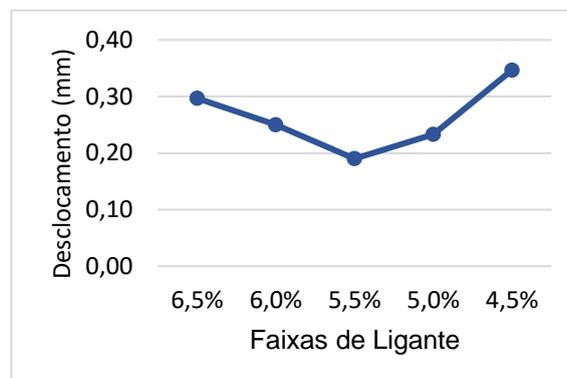


Gráfico 10: Fluência sem adição de fibras.



Fonte: Autoria própria.

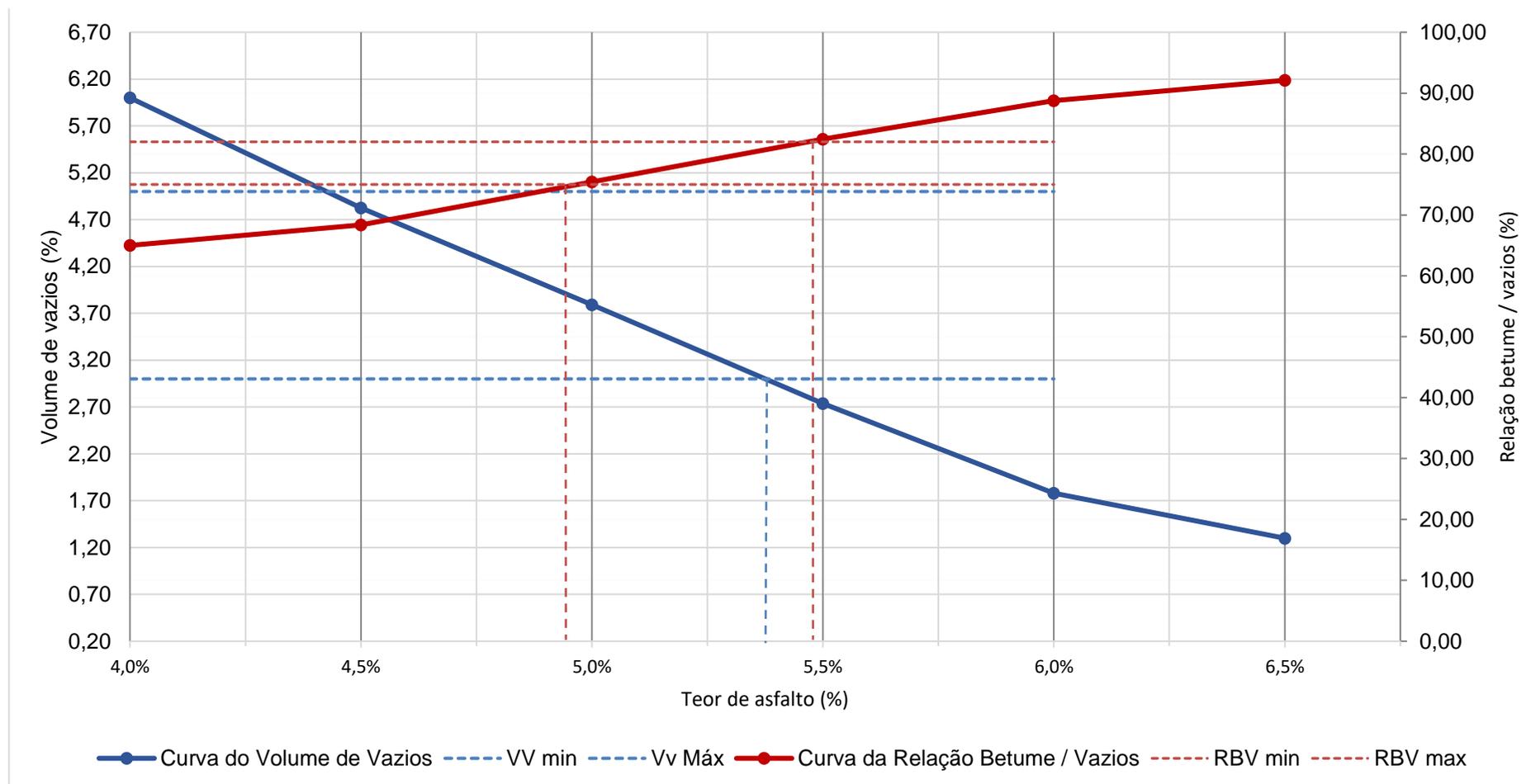
Além disso é possível concluir, conforme o gráfico 10, que a porcentagem de ligante de 5,5 % é a que possui melhor fluência, pois possui o menor deslocamento da mistura. O método para determinação do teor ótimo teve como base os resultados obtidos na relação betume / vazios e também no teor de volume de vazios. A partir dos dados foi traçado um gráfico com os parâmetros *versus* o teor de ligante dos corpos de prova. As duas curvas dos parâmetros utilizados foram sobrepostas, em seguida foram traçados os limites mínimos e máximos. Após aplicados os limites determinou-se 4 valores dos quais os limites tocam as curvas, em seguida calcula-se o teor de projeto como a média dos quatro valores. O valor final correspondeu a 5,04 %, sendo adotado por questões práticas para o estudo o valor final de 5,0 %. Logo abaixo, apresenta-se o quadro e gráfico referentes a determinação do teor ótimo.

Quadro 18: Resultado do teor de projeto.

Teor de Projeto				
Valor 1	Valor 2	Valor 3	Valor 4	Média
4,42	4,94	5,36	5,44	5,04

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 11: Relação betume / vazios e Volume de vazios versus Teor de CAP.



Fonte: Autoria própria.

Após determinado os valores finais de fibra para avaliação, foram executados 6 corpos de prova para cada teor, sendo 03 para cálculo dos parâmetros Marshall e 03 para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral.

Conforme a mesma metodologia aplicada nos corpos de prova sem adição de fibras, atingiu-se os resultados dispostos no Quadro 20.

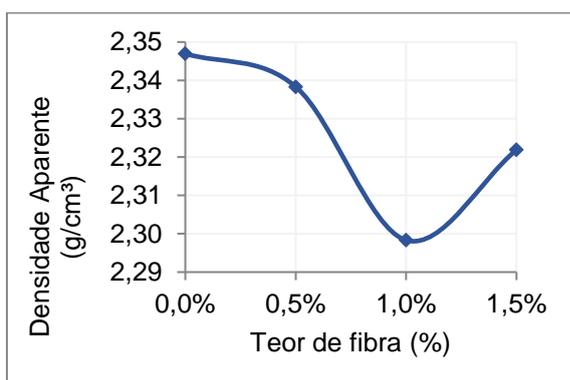
Quadro 19: Medidas e parâmetros Marshall por teor de fibra.

Teor	ϕ (cm)	h (cm)	da (g/cm ³)	DMT	Vv (%)	VCB	VAM	RBV
0,0%	10,17	6,38	2,35	2,44	3,79	11,62	15,41	75,41
0,5%	10,20	6,31	2,34	2,44	4,14	11,58	15,72	73,67
1,0%	10,17	6,41	2,30	2,44	5,78	11,38	17,16	66,32
1,5%	10,21	6,34	2,32	2,44	4,82	11,49	16,31	70,57

Fonte: Autoria própria.

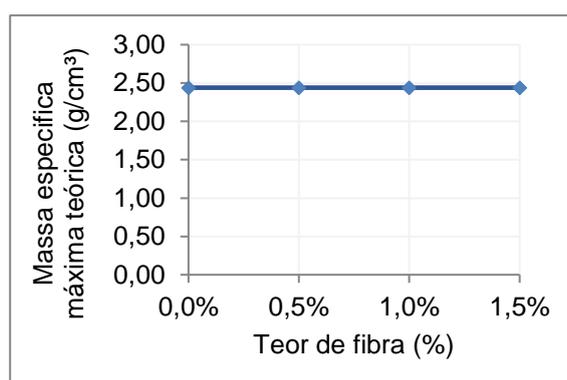
Com relação aos resultados obtidos, deve-se observar que os valores referentes ao volume de vazios, vazios com betume, volume agregado mineral e relação betume vazios encontrados para o teor de 1 % se apresentaram fora da tendência esperada devido ao elevado desvio padrão entre as alturas dos corpos de prova.

Gráfico 13: Densidade aparente



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 14: Massa específica máxima teórica

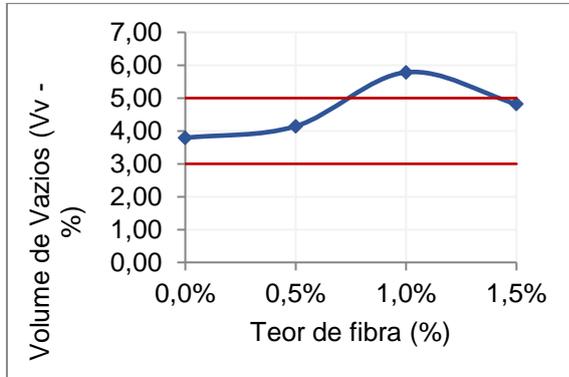


Fonte: Autoria própria.

Ao se observar o Gráfico 13 do índice de vazios x Teor de fibra, percebe-se que apenas o teor de 1% não se enquadra na faixa adequada, entretanto conforme o gráfico 14 entende-se que há uma oscilação na tendência dos valores, essa oscilação possui provável origem na execução dos corpos de prova, visto que a altura média

das amostras de 1% foram as maiores.

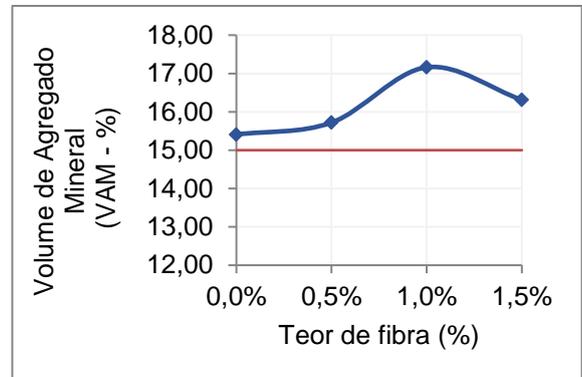
Gráfico 154: Volume de vazios mineral



*Linhas horizontais correspondem aos valores máximos e mínimos estabelecidos por norma.

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 165: Volume de agregado mineral



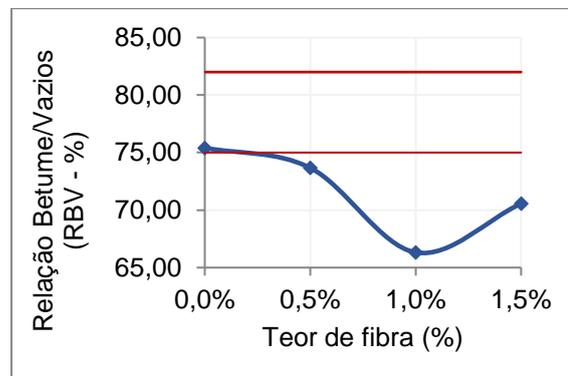
*Linha horizontal corresponde ao valor mínimo estabelecido por norma.

Fonte: Autoria própria.

Novamente sobre o volume de agregado mineral, conclui-se que mesmo ao se inserir fibras na mistura, a mesma atende as normativas específicas, não sendo então um fator que sofre impactos com a adição de fibras de polipropileno e aramida.

Já sobre a relação betume / vazios, a inserção de fibras tornou a mistura com 5% de teor inviável, pois ao se adicionar fibras constatou-se uma queda significativa, sendo assim teores com maior teor de ligante que excedem o limite máximo de 82%, podem ao se adicionar fibras se enquadrar na faixa correta.

Gráfico 176: Relação betume / vazios x Teor de fibra.

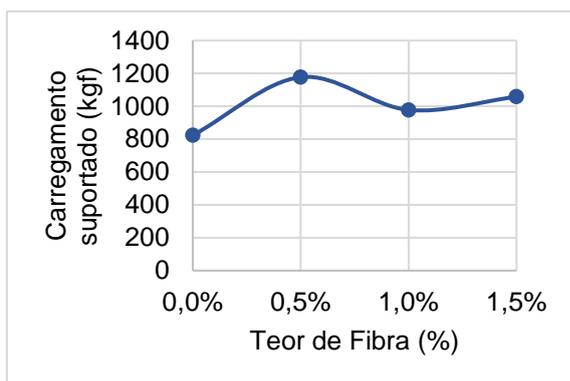


*Linhas vermelhas correspondem aos valores máximos e mínimos estabelecidos por norma.

Fonte: Autoria própria.

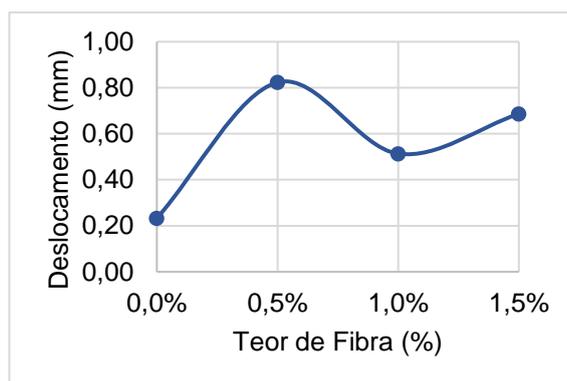
Ao se inserir fibras na mistura, conclui-se que o teor que mais proporciona ganhos no quesito estabilidade é o teor com 0,5 % de fibras, além disso observa-se que ao se adicionar mais fibras têm-se ganhos de estabilidade com relação ao teor de 0 %. O gráfico 18 a seguir apresenta os resultados obtidos conforme o teor de fibra.

Gráfico 187: Estabilidade Marshall
fibras.



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 198: Fluência com adição de
fibras.



Fonte: Autoria própria.

Já com relação a fluência o grande destaque é o teor sem adição de fibras, que conforme o gráfico 19 porque possui menor deslocamento entre os demais, o que é algo favorável para a mistura, visto que dificulta sua deformação.

Sendo assim constata-se que a adição de fibras, em termos gerais, é benéfica, entretanto seu teor é questionável, tendendo para melhor desempenho o uso de 0,5%, porém nenhum teor com adição de fibras respeitou os valores mínimos de RBV, o que implica em uma mistura com vazios em excesso e por consequência uma menor resistência.

4.3.3. Resistência a tração por compressão diametral

Os resultados obtidos nesta etapa do estudo seguem a norma DNIT 136/2018 – ME. Para isso foram executados três corpos de prova e a média dos valores encontrados corresponde ao resultado final. Destaca-se que tanto para as amostras com fibra como sem fibra possuem teor de projeto igual a 5 % do ligante CAP 50/70.

Quadro 20: Resultado de resistência a tração.

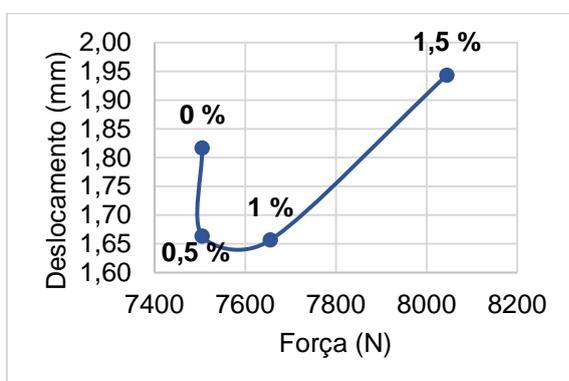
Teor de fibra	0,0%	0,5%	1,0%	1,5%
---------------	------	------	------	------

Força (N)	7505	7505	7656	8045
Deslocamento (mm)	1,82	1,66	1,66	1,94
Resistência a tração (Mpa)	0,744	0,735	0,749	0,790

Fonte: Autoria própria.

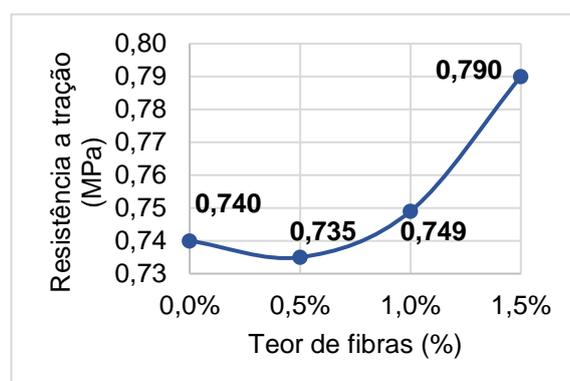
De acordo com os dados apresentados nota-se que ao se inserir fibras na mistura asfáltica há uma queda no deslocamento suportado, entretanto sua carga suportada permaneceu constante. Ao aumentar o teor de fibras de 0,5 % para 1,0 % ocorreu apenas um acréscimo na força suportada sem afetar o deslocamento provocado pelas fibras. Por fim ao se atingir o teor de 1,5% de fibras na mistura houveram mudanças expressivas em ambos os valores, basicamente os valores cresceram se comparados com todos os teores anteriores. Sendo assim o teor de 1% se apresentou como mais interessante, visto que quanto menor o deslocamento e maior a carga suportada, melhor para a mistura asfáltica. O gráfico 19 apresenta a relação entre força média e deslocamento médio conforme os teores de fibras.

Gráfico 20: Força x Deslocamento.



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 210: Resultado da resistência a tração.



Fonte: Autoria própria.

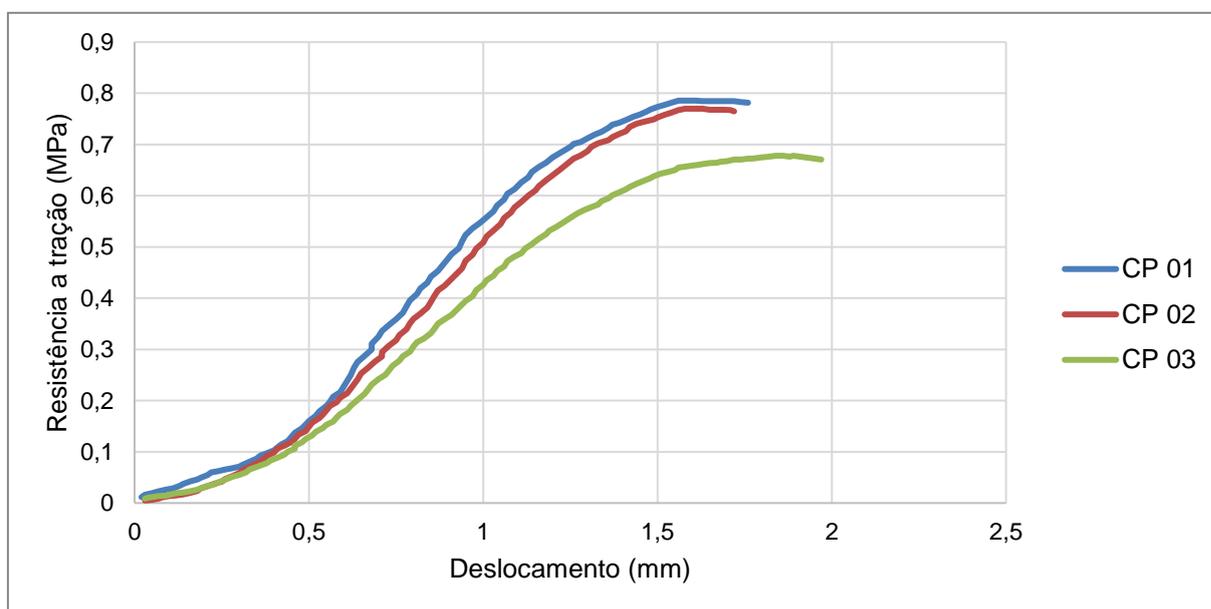
De acordo com os dados apresentados é possível observar que ao se adicionar fibras há uma leve perda na resistência a tração, entretanto conforme o teor de fibras aumenta os resultados atenderam ao previsto, visto que há um ganho exponencial da resistência à tração, além disso de acordo com o fabricante a quantidade ideal corresponde a aproximadamente 1 % de fibra em relação ao ligante, e segundo os dados este teor apresentou um desempenho adequado ao ser comparado a demais teores em que há uso de fibra. Entretanto, destaca-se o teor com 1,5 %, o qual possuiu

elevada resistência conforme o gráfico 20.

Portanto de acordo com a normativa vigente, todos os teores foram aprovados, entretanto o teor de 1,5% possui destaque em relação aos demais. Sendo assim é visível o impacto da adição de fibras, podendo ser este um fator determinante para que a resistência mínima seja assegurada. Por fim conclui-se que a utilização de fibras em misturas asfálticas com um teor de até 1,5 %, é capaz de promover um aumento imediato na resistência a tração de cerca de 6,76 %, entretanto deve-se destacar que a fibra não atua somente instantaneamente, pois com o passar do tempo e com surgimento de fissuramentos no asfalto, a fibra de aramida possui função de reforço ao permitir uma melhor transmissão de cargas.

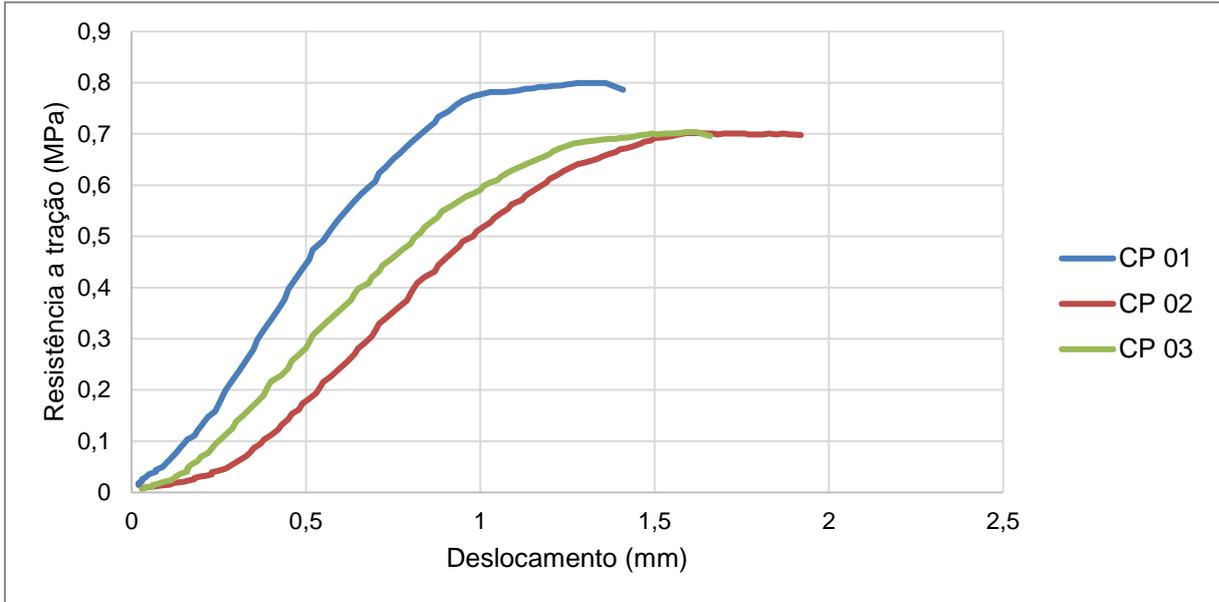
Por fim foi realizado a análise da tenacidade correspondente a cada corpo de prova, este parâmetro corresponde a área da curva gerada entre o deslocamento medido e a resistência a tração causada momento a momento.

Gráfico 221: Resistência a tração por deformação para teor de 0 %.



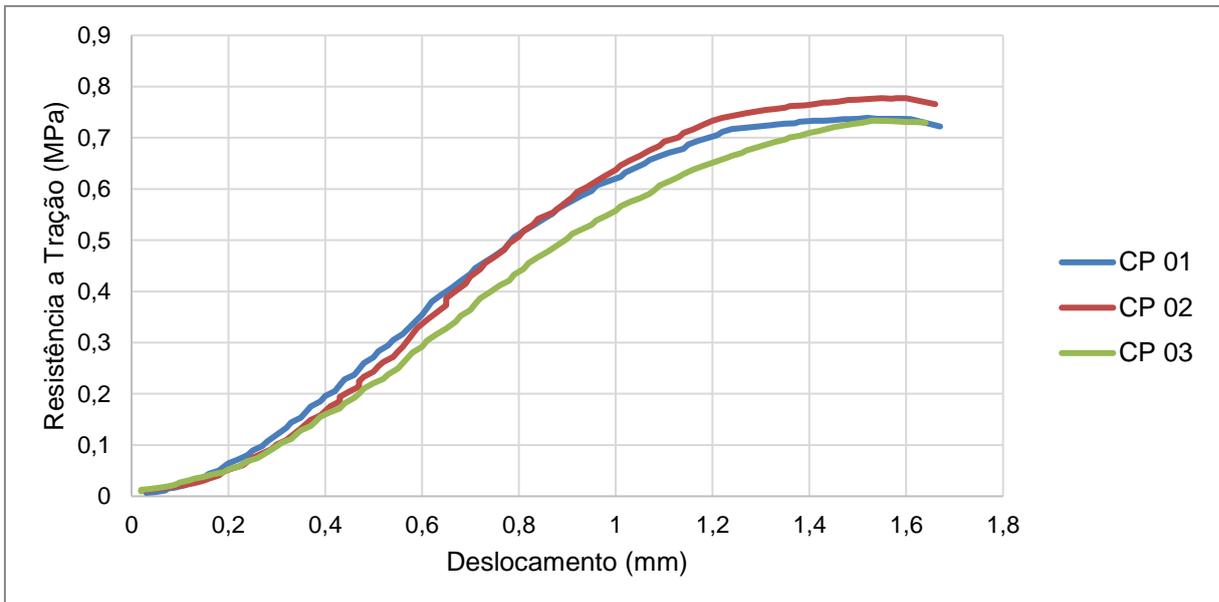
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 232: Resistência a tração por deformação para teor de 0,5 %.



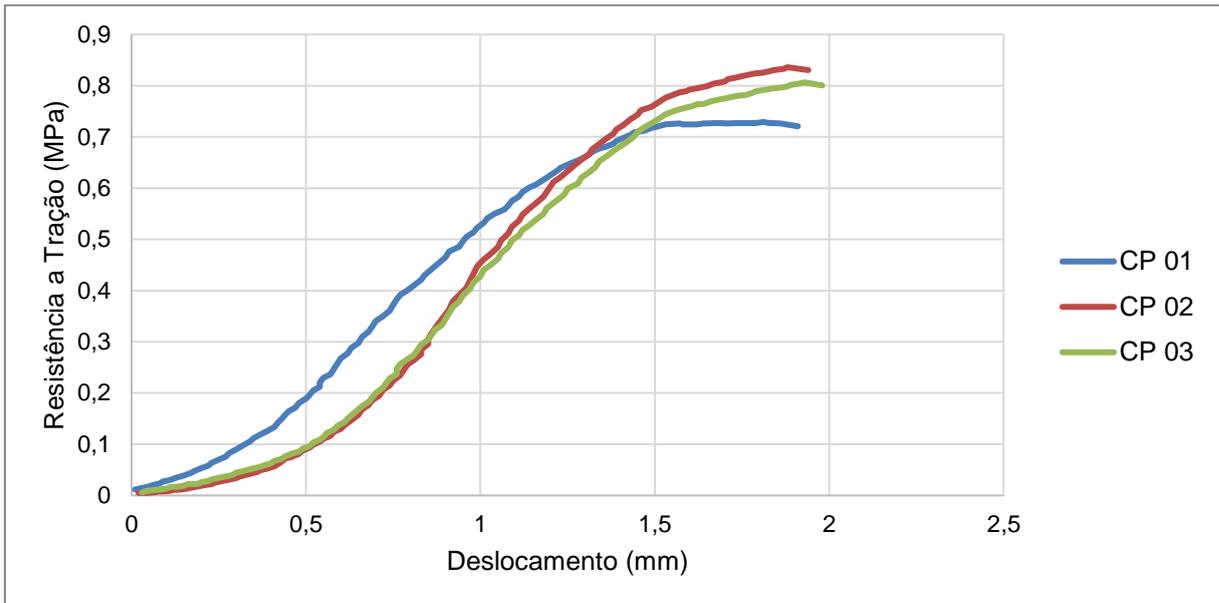
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 243: Resistência a tração por deformação para teor de 1,0 %.



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 254: Resistência a tração por deformação para teor de 1,5 %.



Fonte: Autoria própria.

O quadro 21 a seguir indica os valores finais das áreas geradas por cada curva, e com isto é possível confirmar que ao se adicionar fibras há um ganho quanto a tenacidade da mistura, sendo registrado um acréscimo de 31,3 %.

Quadro 21: Resultado de Tenacidade.

Teor de Fibra	Tenacidade (MPa)			Média
	CP 01	CP 02	CP 03	
0,0%	0,94	0,89	0,76	0,87
0,5%	0,81	0,87	0,96	0,88
1,0%	1,02	1,02	0,94	0,99
1,5%	0,90	1,26	1,25	1,14

Fonte: Autoria própria.

5. Conclusão

Face às questões abordadas no presente trabalho, à metodologia utilizada e após uma avaliação dos resultados atingidos com a realização do ensaio Marshall e demais ensaios, algumas considerações devem ser feitas.

Para que se atenda o limite mínimo por norma do volume de vazios, valor correspondente a 3 %, se faz necessário o uso de um teor de ligante máximo equivalente a 5%, mesmo que demais teores possam apresentar melhores desempenho quanto a estabilidade e fluência.

De acordo com os teores de ligantes avaliados durante a determinação do teor de projeto, foi possível averiguar que os teores foram aprovados em todas as características avaliadas com exceção de duas, sendo os fatores excludentes a relação betume / vazios e o volume de vazios, pois estes se encontram abaixo do valor mínimo determinado por normativa. Quanto ao volume de vazios apenas os teores de 4,5 % e 5,0 % foram aprovados perante a norma. Já quanto ao volume de vazios somente o teor de CAP 50 / 70 de 5 % se encontrava apto conforme sua normativa.

Ao se aumentar o teor de fibras de polipropileno e aramida nas misturas, constata-se um aumento significativo na estabilidade e fluência, seguido de leve queda e novo acréscimo. Outro ponto importante é a resistência a tração, foi possível determinar uma curva de tendência justa sobre a relação da adição de fibras de aramida e polipropileno e a resistência a tração das amostras, indicando que a inserção de fibras é um caminho eficiente para ganhos na resistência.

Dentre as misturas executadas, todas atenderam às suas respectivas normativas, com exceção da relação betume / vazios, que apenas misturas executadas sem a adição de fibras obtiveram resultados adequados a normativa.

Além disso foi constatado conforme esperado um acréscimo na resistência a tração das amostras ao se adicionar fibras, entretanto ao se adicionar uma quantidade elevada de fibras (a partir de 1,5%), a mistura tende a crescer tanto sua carga suportada como seu deslocamento.

Por fim, constatou-se que os parâmetros marshall obtiveram resultados interessantes, sendo os principais benefícios o aumento do volume de agregado mineral e estabilidade, pois estes tiveram aumento significativo se comparados com as misturas sem adição de fibras. Já outros impactos observados ao se adicionar fibras foram, redução expressiva da massa específica aparente, aumento excessivo do volume de vazios (aproximadamente 2%), queda brusca da relação betume / vazios

(aproximadamente 10%), entretanto deve-se compreender que estes aumentos e quedas já eram esperados, sendo necessário apenas constatar o impacto gerado em misturas asfálticas. Deve-se destacar os efeitos sofridos do RBV, pois este permaneceu abaixo do valor mínimo exigido por norma em todos os teores em que houve adição de fibras, tornando todos os teores inaptos a aplicações práticas comuns de acordo com a norma DNER – ME 043, entretanto sua utilização não deve ser descartada, mas deve-se futuramente criar normativas específicas para misturas com adição de fibras poliméricas, para tornar prático seu uso em situações reais .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, J-P. **Roman building: materials and techniques**. London: B.T. Batsford, 1994.

ARAÚJO, D. H. **Análise comparativa do asfalto borracha com o asfalto convencional e o asfalto com adição de polímeros**. Formiga, 2015.

ARAÚJO, F. L. P. **Caracterização Dos Materiais E Misturas Asfálticas Utilizados Na Recuperação Do Sistema De Pistas De Uma Base Aérea**. Trabalho de conclusão de curso em engenharia civil, Natal – RN, 2018.

ARTERIS. **Massa Específica Teórica Máxima E Densidade De Misturas Asfálticas Para Pavimentação**. Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CDT), 2014.

ASTM - American Society for Testing Materials. **ASTM D4 124 – 01 – Standard Test Methods for Separation of Asphalt into Four Fractions**. In: Annual Book of ASTM Standards, 2001.

BARBOSA, R. C. **Análise De Misturas Asfálticas Modificadas Com Borracha De Pneus Pelo Processo Seco**- Trabalho de conclusão de curso em engenharia civil, João Pessoa – PB, 2016.

BITTENCOURT, E.R. **Caminhos e estradas na geografia dos transportes**. Rio de Janeiro: Editora Rodovia, 1958.

CALLISTER, J. WILLIAM. D. **Ciência e engenharia de materiais** - uma introdução. 8ª Ed. Brasil, LTC, 2012.

CAPRONI JUNIOR, N., PALOCCI, A., BUENO, B.S. **Estudo de solo-cimento reforçado com fibras de polipropileno**. Simpósio Sul-Americano De Geossintéticos. Rio de Janeiro, 1999.

DNER 043/95 – ME: Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall. 11 p. Rio de Janeiro, 1995.

DNER 078/94 – ME: Agregado graúdo, adesividade ao ligante betuminoso. 3 p. Rio de Janeiro, 1994.

DNER 083/98 – ME: Agregados – análise granulométrica. 5 p. Rio de Janeiro, 1998.

DNER 194/98 – ME: Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. 4 p. Rio de Janeiro, 1998.

DNER 386/99 –ME : determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. 4 p. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT 136/2010 – ME. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. 6 f. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT-ES 031/2006. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço, Rio de Janeiro, 2006.

MATTHEWS F. L., Rees D. Rawlings. **Composite Materials: Engineering and Science.** Woodhead Publishing, 1999.

FIGUEIREDO A.D. **Concreto com Fibras de Aço. Boletim Técnico** - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

GENARO, C.F. NASCIMENTO, M. S. **Análise E Melhoramento Da Adesividade Do Agregado Granítico Ao Ligante Betuminoso Em Misturas Asfálticas,** Ponta Grossa, 2017.

HAGEN, V.W. **A estrada do sol.** São Paulo: Edições Melhoramentos, 1955.

HANNANT, L. (1994) – **Fibre-reinforced Cements and Concretes** – London, 2ed, 1994.

HEINECK, K.S.; CONSOLI, N.C. **Influência da adição de fibras na resistência última de solos.** Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia 98 geotécnica, São Paulo, 2002.

HIGGINS, W.A.. **Chemical modifiers to improve the strength and durability of asphalt concrete.** 1987.

HISTÓRIA DAS RODOVIAS. 2004. Disponível em: <<http://estradas.com.br>>. Acesso em: 01/09/2019.

HOLLAWAY, L. **Handbook of Polymer Composites for Engineers.** Woodhead Publishing, 1994.

JOHNSTON, C. D. (1994) – **Fibre-reinforced Cement and Concrete – Advances in Concrete Technology,** 2ed, 1994.

LEITE, L.F.M., **Estudo de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímeros.** Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1999.

LIMA, F. C., LEITE, L.F.M., **Estudo de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímeros.** Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1999.

LUCENA, M. C. C. (2005). **Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros.** Tese de Doutorado apresentada à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Química inorgânica, UFC, Fortaleza, CE.

MANO, Eloisa B. – **Introdução a Polímeros,** Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 1986

MELLO, L. G. R.; Kaloush, K. E.; Farias, M. M. (2008). **Avaliação do uso de fibras sintéticas em mistura asfálticas**. Revista Pavimentação, Ano III, Nº11 .

MOLZ, C. – **Viabilidade Da Utilização Do Material Fresado Estabilizado Granulometricamente Em Base De Pavimentos**, Trabalho de conclusão de curso em engenharia civil, Santa Maria–RS , 2017.

MONTARDO, J.P. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento- fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS, Porto Alegre.

MORILHA JR., **Estudo Sobre A Ação De Modificadores No Envelhecimento Dos Ligantes Asfálticos E Nas Propriedades Mecânicas E De Fadiga Das Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). 2004.

NBR NM 248/2001. Agregados - Determinação da composição granulométrica, 2001.

NEGRÃO, D.P. **Estudo de Asfaltos Modificados por Polímeros do Tipo RET para Aplicações em Pavimentos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

NM 52/2009. Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente, 2009.

NM 53/2009. Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água, 2009.

Pesquisa Rodoviária – Impactos da Qualidade do Asfalto sobre o Transporte Rodoviário. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2007c. Disponível em: < www.cnt.gov.br >. Acesso em: 10 set. 2019.

Pesquisa Rodoviária – Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram? Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2007c. Disponível em: < www.cnt.gov.br >. Acesso em: 08 set. 2019.

PINTO, S.; GUARÇONI, D.; CHEQUER, C.J. **Pesquisa de asfaltos modificados por polímeros**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, 1998.

PIZZORNO. **Cimento Asfáltico De Petróleo Puro E Modificado Com Suas Frações Fundamentais: Um Estudo Por Microscopia De Força Atômica**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

PIZZORNO, Bianca S., **Efeito Do Solvente E Da Temperatura Na Morfologia Superficial Do Cimento Asfáltico De Petróleo**, dissertação de mestrado, PEMM/COPPE/UFRJ, 2010

PREGO, A.S.S. **A memória da pavimentação no Brasil**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2001.

SALAVERRÍA, J. H.; CASAS, J. R.; APARICIO, A.C. **Estúdio experimental sobre El uso de fibras aramidadas para reparación y refuerzo de puentes existentes.** IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, 1997.

SANTOS, D. G. **Estudo Termo-Hídrico E Caracterização Mecânica De Compósitos De Matriz Polimérica Reforçados Com Fibra Vegetal: Simulação 3d E Experimentação.** Tese de Doutorado apresentada à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Engenharia de processos, UFCG, Campina Grande – PB, 2017.

SHELL. **The Shell bitumen handbook.** 5. ed. Cambridge, 2003

SILVA, L. S. (2005). **Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV.** Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais , UFRGS, Porto Alegre, RS.

SILVA A. F. SIQUEIRA J. C. SEVERINO L. F. **Estudo Comparativo De Concreto Betuminoso Usinado A Quente Com Diferentes Tipos De Ligantes Utilizados Em Goiânia.** Goiânia – GO, 2016.

SOUZA. **Efeito De Fibras Sintéticas Nas Propriedades De Ligantes E Concretos Asfálticos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). 2010.

TAYLOR, G. D. **Materials in Construction.** Longman Scientific & Technical, 2ed, 1994.

TEODORO. **Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas.** (1999).