

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**LAURA BECKER JUNGES**

**VERIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE FIBRAS VEGETAIS EM  
MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO**

**Alegrete  
2017**

**LAURA BECKER JUNGES**

**VERIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE FIBRAS VEGETAIS EM  
MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Jaelson Budny

**Alegrete  
2017**

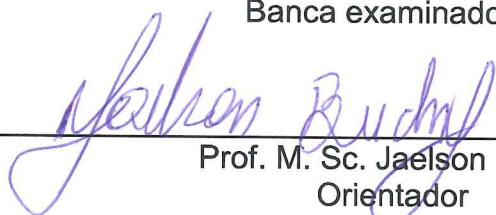
**LAURA BECKER JUNGES**

**VERIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE FIBRAS VEGETAIS EM  
MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 26 de Junho de 2017.

Banca examinadora:



---

Prof. M. Sc. Jaelson Budny  
Orientador  
(UNIPAMPA)



---

Prof. M. Eng. Maurício Silveira dos Santos  
(UNIPAMPA)



---

M. Eng. Fernando Dekeper Boeira  
(UFSM)

Dedico este trabalho a meus pais, Egídio e Aurea, por todo apoio, educação, amor e carinho, incentivando sempre a lutar pelos meus sonhos. Obrigada por estarem sempre ao meu lado.

## AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por me dar força e coragem e me fazer sempre acreditar em dias melhores.

Aos meus pais, pelo amor e incentivo, por compartilharem comigo momentos de alegria e me darem força nos momentos difíceis. Espero um dia poder contribuir tudo de bom que vocês já me propuseram.

À minha irmã e colega de algumas disciplinas, que sempre esteve ao meu lado, compartilhando juntas momentos difíceis, de ansiedade, e felizes também.

Ao meu namorado, pelo apoio, amor, paciência e pela compreensão de privar nosso tempo juntos em algumas ocasiões.

Aos meus cunhados, sogro, sogra e demais familiares que me acompanharem nesta jornada, incentivando, torcendo e motivando sempre.

Aos colegas e amigos, que fizeram parte da trajetória, dividindo momentos de descontração, estudos, discussões, experiências e conquistas, principalmente ao Lucas, Lisiane, Aline e Cibele pela ajuda nas moldagens e ensaios.

Agradeço aos professores que sempre estavam dispostos a ajudar e contribuir para um melhor aprendizado, em especial, ao meu orientador, Jaelson Budny, pelo apoio, orientação e conhecimento para a realização deste trabalho.

Aos professores membros da banca avaliadora pelo conhecimento e orientações, contribuindo para melhorar a pesquisa, em especial, ao Professor Mauricio Silveira dos Santos, pelo apoio e ajuda.

Agradeço aos técnicos dos laboratórios de Solos e Pavimentação e Materiais de Engenharia Civil da UNIPAMPA, pelo auxílio e disposição ao longo do trabalho.

Ao laboratório e ao Engenheiro Fernando da Universidade Federal de Santa Maria por realizar o ensaio de módulo de resiliência.

A Universidade Federal do Pampa e a todos os funcionários nela inseridos, por me dado a chance e as ferramentas que permitiram chegar hoje ao final desse ciclo de maneira satisfatória.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Sem sonhos, a vida não tem brilho. Sem metas, os sonhos não têm alicerces. Sem prioridades, os sonhos não se tornam reais. Sonhe, trace metas, estabeleça prioridades e corra riscos para executar seus sonhos. Melhor é errar por tentar do que errar por se omitir”.

Augusto Cury

## RESUMO

Com o aumento do volume de tráfego nas rodovias nos últimos anos, torna-se cada vez mais importante um pavimento que atenda aos requisitos de alta durabilidade e segurança, proporcionando conforto aos usuários. Assim, para a melhoria da eficiência dos pavimentos é de fundamental importância o emprego de novos materiais que possam contribuir para a melhoria das condições gerais dos pavimentos. Neste contexto, o presente estudo visa avaliar a utilização de fibras de Capim Annoni como material de reforço em misturas asfálticas. Primeiramente, realizou-se um estudo das propriedades (absorção, peso específico, umidade, resistência à tração e módulo de elasticidade) do Capim Annoni para aplicação como reforço em misturas asfálticas. Esta pesquisa considerou quatro adições de fibras de capim annoni na mistura asfáltica e uma mistura convencional para tal comparação do comportamento mecânico. A dosagem Marshall foi realizada para a caracterização volumétrica das misturas, seguida de dois ensaios mecânicos: módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral. Os resultados dos ensaios das misturas com adições foram comparados com a mistura sem fibra e também com a mistura com fibras de polipropileno de Heck (2015), bem como avaliados se atendem ao recomendado pela norma do DNIT. De acordo com os resultados, somente a mistura com adição 1% 1 cm de fibra que não atendeu ao requisito mínimo exigido pela norma. De um modo geral, pode-se afirmar que a adição de fibra de capim annoni como material de reforço para pavimentos flexíveis tem um futuro promissor, visto que dentre as propriedades estudadas existe uma tendência de melhoria é vantajosa, pois suporta valores consideráveis de deformações em determinado período de tempo.

Palavras-Chave: Mistura asfáltica, fibras vegetais, propriedades mecânicas.

## **ABSTRACT**

With the increase in the volume of traffic on the highways in recent years, it becomes increasingly important a floor that meets the requirements of high durability and safety, providing comfort to users. Thus, to improve the efficiency of the floors is of fundamental importance the use of new materials that can contribute to the improvement of the general conditions of the floors. In this context, the present study aims to evaluate the use of Annoni grass fibers as reinforcement material in asphalt mixtures. Firstly, a study of the properties (absorption, specific weight, humidity, tensile strength and modulus of elasticity) of Capim Annoni for application as reinforcement in asphalt mixtures was carried out. This study considered four additions of annoni grass fibers in the asphalt mixture and a conventional blend for such comparison of mechanical behavior. The Marshall dosage was performed for the volumetric characterization of the mixtures, followed by two mechanical tests: resilience modulus and tensile strength by diametrical compression. The results of the tests of mixtures with additions were compared to the mixture without fiber and also to the blend with polypropylene fibers of Heck (2015), as well as evaluated if they meet the recommended by the DNIT standard. According to the results, only the blend with addition 1% 1cm of fiber that did not meet the minimum requirement required by the standard. In general, it can be affirmed that the addition of annoni grass fiber as a reinforcement material for flexible pavements has a promising future, since among the studied properties there is a trend of improvement, since it supports considerable values of deformations in period of time.

**Keywords:** Asphalt mixtures, vegetable fibers, mechanical properties.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção transversal da estrutura do pavimento .....	22
Figura 2 - Corte longitudinal de um pavimento asfáltico.....	23
Figura 3 - Corte longitudinal de um pavimento concreto-cimento .....	23
Figura 4 - Variação da serventia no tempo (desempenho do pavimento) .....	26
Figura 5 - Estrutura das fibras .....	35
Figura 6 - Capimannoni.....	38
Figura 7 - Bagaço de cana-de-açúcar .....	39
Figura 8 - Fibra de coco .....	40
Figura 9 - Planta de sisal.....	41
Figura 10 - Fibra de celulose.....	42
Figura 11 - Planta de rami.....	43
Figura 12 - Planta de juta .....	43
Figura 13 - Sequência dos procedimentos metodológicos .....	44
Figura 14 – Composição da mistura.....	47
Figura 15 - Fibra de capimannoni.....	50
Figura 16 - Procedimentos para a realização do ensaio de resistência à tração .....	52
Figura 17- Sequência dos procedimentos realizados para determinar o peso específico do capim.....	54
Figura 18 - Determinação da umidade da fibra de capimannoni .....	55
Figura 19 - Procedimentos realizados para determinar a absorção das fibras .....	57
Figura 20 - Sequência de moldagem das misturas .....	60
Figura 21 - Sequência final de compactação e desmoldagem .....	61
Figura 22 - Procedimento do ensaio de massa específica aparente .....	63
Figura 23 - Sequência para a determinação da massa específica máxima .....	66
Figura 24 - Medição dos corpos de prova .....	69
Figura 25 - Sequência de ensaio do módulo de resiliência .....	71
Figura 26 - Sequência de ensaio de RT .....	72
Figura 27 - Esquema do ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diâmetros e denominações de pedras britadas .....	28
Tabela 2 - Composição química de algumas fibras naturais (%) .....	34
Tabela 3 - Propriedades físicas e mecânicas de fibras naturais .....	36
Tabela 4 - Composição dos agregados.....	45
Tabela 5 – Composição da mistura.....	48
Tabela 6 - Propriedades físico-químicas do CAP 50/70.....	48
Tabela 7 - Ensaio de viscosidade do CAP 50/70 .....	49
Tabela 8 - Peso específico da fibra de capim annoni.....	55
Tabela 9 - Umidade da fibra de capim annoni.....	56
Tabela 10 - Absorção da fibra de capim annoni.....	58
Tabela 11 - Massa específica aparente (Gmb) da mistura convencional.....	64
Tabela 12 - Massa específica aparente (Gmb) da mistura de 1 cm .....	64
Tabela 13 - Massa específica aparente (Gmb) da mistura de 2 cm .....	64
Tabela 14 – Massa específica máxima da mistura convencional.....	67
Tabela 15 – Massa específica máxima da mistura de 1 cm.....	67
Tabela 16 – Massa específica máxima da mistura de 2 cm.....	67
Tabela 17- Quantitativo dos corpos de prova.....	69
Tabela 18 - Resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra a T.A. ....	75
Tabela 19 - Resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra a 60 °C.....	75
Tabela 20 - Resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra a 100 °C.....	76
Tabela 21 - Resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra a 150 °C.....	76
Tabela 22 - Volume de vazios para a mistura convencional .....	78
Tabela 23 - Volume de vazios para a mistura 0,5% 1 cm .....	79
Tabela 24 - Volume de vazios para a mistura 1% 1 cm .....	79
Tabela 25 - Volume de vazios para a mistura 0,5% 2 cm .....	79
Tabela 26 - Volume de vazios para a mistura 1% 2 cm .....	80
Tabela 27 - Módulo de resiliência da mistura convencional .....	84
Tabela 28 - Módulo de Resiliência da mistura 0,5% 1 cm.....	84
Tabela 29 - Módulo de resiliência da mistura 1% 1 cm .....	85
Tabela 30 - Módulo de resiliência da mistura 0,5% 2 cm .....	85
Tabela 31 - Módulo de resiliência da mistura 1% 2 cm .....	86
Tabela 32 - RT da mistura convencional.....	90

Tabela 33 - RT da mistura 0,5% 1 cm.....	90
Tabela 34 - RT da mistura 1% 1 cm.....	91
Tabela 35 - RT da mistura 0,5% 2 cm.....	91
Tabela 36 - RT da mistura 1% 2 cm.....	92
Tabela 37 - Relação MR/RT das misturas .....	98

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica de trabalho .....	46
Gráfico 2 - Curva granulométrica de trabalho / Faixa "C" do DNIT.....	48
Gráfico 3 - Viscosidade do ligante asfáltico CAP 50/70 .....	50
Gráfico 4 – Resistência à tração da fibra de capim annoni .....	77
Gráfico 5 - Módulo de elasticidade da fibra de capim annoni.....	77
Gráfico 6 - Teor de ligante X volume de vazios para a mistura convencional .....	80
Gráfico 7 - Teor de ligante X volume de vazios para a mistura 0,5% 1 cm .....	81
Gráfico 8 - Teor de ligante X volume de vazios para a mistura 1% 1 cm .....	81
Gráfico 9 - Teor de ligante X volume de vazios para a mistura 0,5% 2 cm .....	82
Gráfico 10 - Teor de ligante X volume de vazios para a mistura 1% 2 cm .....	82
Gráfico 11 - MR da mistura convencional .....	87
Gráfico 12 - MR da mistura 0,5% 1 cm .....	87
Gráfico 13 - MR da mistura 1% 1 cm .....	88
Gráfico 14 - MR da mistura 0,5% 2 cm .....	88
Gráfico 15 - MR da mistura 1% 2 cm .....	89
Gráfico 16 - RT da mistura convencional .....	92
Gráfico 17 - RT da mistura 0,5% 1 cm .....	93
Gráfico 18 - RT da mistura 1% 1 cm .....	93
Gráfico 19 - RT da mistura 0,5% 2 cm .....	94
Gráfico 20 - RT da mistura 1% 2 cm .....	94
Gráfico 21 - RT X Deformação da mistura convencional .....	95
Gráfico 22 - RT X Deformação da mistura 0,5% 1 cm .....	96
Gráfico 23 - RT X Deformação da mistura 1% 1 cm .....	96
Gráfico 24 - RT X Deformação da mistura 0,5% 2 cm .....	97
Gráfico 25 - RT X Deformação da mistura 1% 2 cm .....	97
Gráfico 26 - Relação MR/RT da mistura convencional.....	99
Gráfico 27 - Relação MR/RT da mistura 0,5% 1 cm.....	99
Gráfico 28 - Relação MR/RT da mistura 1% 1 cm.....	100
Gráfico 29 - Relação MR/RT da mistura 0,5% 2 cm.....	100
Gráfico 30 - Relação MR/RT da mistura 1% 2 cm.....	101
Gráfico 31 - MR da mistura com fibra de polipropileno .....	102
Gráfico 32 – RT da mistura com fibra de polipropileno .....	102

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – Association of State Highway and Transportation Officials

ASTM – American Society for Testing and Materials

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CNT – Confederação Nacional do Transporte

CP – Corpo de Prova

CPA – Camada Porosa de Atrito

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

E – Módulo de Elasticidade

Gmb – Massa específica aparente

Gmm – Massa específica máxima

LVDT – Linear Variable Differential Transducer

MR – Módulo de Resiliência

PUM = Peso úmido após a absorção d'água

PEST = Peso da fibra seca em estufa

RT – Resistência à tração por compressão diametral

SMA - Stone Matrix Asphalt

TA – Temperatura Ambiente

$\mu\text{m}$  - micrometro

Vv – Volume de vazios

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	18
1.2	Justificativa	18
1.3	Estrutura do trabalho	19
<b>2</b>	<b>CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>20</b>
2.1	Estrutura do pavimento	20
2.2	Comportamento e desempenho dos pavimentos flexíveis	24
2.3	Mecanismos de degradação dos pavimentos flexíveis	24
2.4	Misturas Asfálticas	26
2.4.1	Agregados	28
2.4.2	Ligante asfáltico	29
2.4.2.1	Cimentos asfálticos	29
2.5	Utilização de fibras como material de reforço	30
2.5.1	Fibras vegetais	33
2.5.1.1	Capim Annoni	37
2.5.1.2	Cana-de-açúcar	38
2.5.1.3	Coco	40
2.5.1.4	Sisal	41
2.5.1.5	Celulose	41
2.5.1.6	Rami	42
2.5.1.7	Juta	43
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>44</b>
3.1	Materiais	44
3.1.1	Agregados	45
3.1.2	Ligante asfáltico	48
3.1.2.1	Ensaio de viscosidade	49
3.1.3	Fibras	50
3.1.3.1	Determinação das propriedades físicas e químicas do capim annoni	51
3.1.3.1.1	Ensaio de resistência à tração	51
3.1.3.1.2	Peso Específico	53

3.1.3.1.3 Umidade .....	55
3.1.3.1.4 Absorção de água .....	56
3.2 Ensaio com as misturas asfálticas .....	58
3.2.1 Misturas asfálticas .....	58
3.2.2 Dosagem Marshall.....	59
3.2.2.1 Massa específica aparente (Gmb).....	62
3.2.2.2 Massa específica máxima (Gmm) .....	65
3.2.2.3 Volume de vazios x teor de ligante ótimo .....	68
3.2.3 Quantitativo dos corpos de prova necessários.....	68
3.2.4 Ensaio mecânicos .....	70
3.2.4.1 Ensaio módulo de resiliência .....	70
3.2.4.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	72
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	74
4.1 Ensaio de resistência à tração da fibra de capimannoni .....	74
4.2 Caracterização volumétrica das misturas.....	78
4.3 Caracterização mecânica das misturas.....	83
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	103
5.1. Sugestões para trabalhos futuros .....	104
REFERÊNCIAS.....	105

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de transporte são elementos estruturantes da vida econômica e social de cidades, regiões ou países. Eles proporcionam os deslocamentos de cargas e de passageiros, realizados pelos diferentes modos de transporte. Herdada de uma política governamental adotada ainda em meados do século passado, o sistema viário brasileiro apresenta forte propensão ao uso do modal rodoviário (MOURÃO, 2003). Esta característica faz com que a infraestrutura das estradas assuma papel fundamental na modalidade em nosso país, onde o transporte é de cerca de 61,1% das cargas e de 95% dos passageiros ocorre por via rodoviária (CNT, 2016).

Um pavimento pode ser definido como uma estrutura formada por múltiplas camadas capazes de suportar a ação do tráfego e do meio ambiente. Assim, estrutura do pavimento é muito importante, onde as camadas constituintes devem distribuir as solicitações de carga, limitando as deformações, garantindo um desempenho adequado da via, por um longo período de tempo (BERNUCCI, 2008).

O estado de conservação do pavimento é um elemento de fácil percepção por parte do usuário da rodovia e um dos determinantes do desempenho durante as viagens, em que os defeitos ou irregularidades no pavimento afetam diretamente o conforto e a segurança, bem como diminuem a durabilidade dos componentes do sistema rodoviário e influenciam o aumento do risco de acidentes e custos.

Anualmente a Confederação Nacional do Transporte (CNT) realiza uma pesquisa sobre as condições das rodovias brasileiras, que abrange todas as rodovias federais e os principais trechos estaduais, diagnosticando que 58,2% dos pavimentos com algum tipo de deficiência, sendo 34,6% classificados como regular, 17,3% como ruim e 6,3% classificados como péssimo (CNT, 2016).

Este cenário demonstra que é fundamental melhoria da eficiência dos pavimentos o emprego de novas tecnologias ou técnicas já consagradas em outros países, que possam contribuir para a melhoria das condições gerais dos pavimentos brasileiros, diminuindo assim, defeitos estruturais como deformações permanentes, decorrentes das solicitações de cargas elevadas, bem como alto grau de trincamento decorrente da fadiga dos revestimentos quando não se utiliza materiais adequados ou um projeto correto.

A utilização de fibras como material de reforço em misturas asfálticas confere maior resistência de envelhecimento em decorrência do maior filme de ligante,



como também, uma maior durabilidade no pavimento sujeito a cargas decorrentes do tráfego e condições ambientais em que é exposto (HAGOS, 2008).

As fibras, conforme Homem (2002) podem ser de origem natural, os asbestos e a celulose, ou industrializadas, classificando-se como sintéticas (poliéster, polietileno, polipropileno e acrílico) e inorgânicas (aço, vidro e minerais).

As fibras naturais têm sido amplamente utilizadas como reforço em matrizes poliméricas para a obtenção de compósitos por serem provenientes de uma fonte renovável e apresentarem baixo custo, baixa densidade e abrasividade, passível de reciclagem e ainda podem ser retiradas de diferentes partes da planta: do caule (juta, bagaço de cana-de-açúcar), folhas (sisal), do fruto (coco) e do tronco, a madeira (BRANDÃO, 2015).

A utilização de fibras vegetais em misturas asfálticas do tipo SMA (Stone Matrix Asphalt) têm sido objeto de alguns estudos em decorrência que pode conferir propriedades interessantes nas misturas asfálticas, como boa rigidez, melhor resistência ao impacto, características de isolamento térmico e acústico (VALE, 2007).

Vale (2007) realizou experimentos com fibras de celulose e de coco em misturas asfálticas do tipo SMA, obtendo resultados satisfatórios. Leal (2013), também utilizou fibra vegetal, de cana-de-açúcar, como aditivo estabilizante em misturas do tipo SMA.

O capimannoni, muito abundante na região do pampa, apresenta uma elevada resistência à tração mecânica e baixa qualidade nutricional, apresentando-se assim, como uma alternativa de reforço nas misturas asfálticas.

Desta forma, é fundamental a realização de pesquisas que avaliem a influência da adição de fibras vegetais nas misturas asfálticas, visando à diminuição de defeitos e o aumento da capacidade de deformação e vida útil do pavimento.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar a viabilidade de utilização de fibras vegetais em misturas asfálticas, por meio de ensaios mecânicos que avaliem o

comportamento mecânico frente a incorporação de fibras vegetais em misturas de concreto asfáltico.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Dentre os objetivos específicos dessa pesquisa, podem-se citar:

- Analisar o comportamento da fibra do capimannoni, em diferentes temperaturas de secagem, por meio do ensaio de resistência à tração;
- Avaliar a influência da adição de fibra de capimannoni em diferentes teores e comprimentos nas misturas asfálticas;
- Avaliar o comportamento mecânico das misturas por meios de ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência;
- Comparar os resultados obtidos com resultados de misturas convencionais e com adição de outras fibras já existentes.

## **1.2 Justificativa**

Com o aumento do volume de tráfego dos veículos nas rodovias, torna-se cada vez mais importante um pavimento que atenda aos requisitos de alta durabilidade e segurança, proporcionando tranquilidade e conforto aos usuários. Além do mais, a relação custo-benefício é um fator que exerce influência na escolha do revestimento asfáltico. Optar por uma alternativa de alta durabilidade reduz os custos de manutenção e operação das vias durante sua vida útil.

Como o capimannoni é uma grande ameaça a região do pampa, não podendo ser utilizado para o pastejo por possuir baixa qualidade nutricional, torna-se como uma alternativa a ser utilizado como reforço em misturas asfálticas.

Levando-se em consideração o aparecimento precoce de defeitos em pavimentos asfálticos e as pesquisas com resultados satisfatórios com a utilização de fibras como material de reforço, a pesquisa justifica-se na análise do potencial das fibras vegetais como material de reforço em misturas de concreto asfáltico, técnica ainda pouco explorada.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

A pesquisa foi organizada em 5 capítulos para alcançar os objetivos estabelecidos:

O primeiro contém a introdução, objetivos, justificativa e a estrutura proposta.

Uma revisão bibliográfica é feita no capítulo 2, abordando temas como a estrutura do pavimento, comportamento e desempenho dos pavimentos flexíveis, mecanismos de degradação dos pavimentos, misturas asfálticas, seus constituintes e propriedades, bem como as fibras vegetais como materiais de reforço.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia proposta para a realização da pesquisa.

No quarto capítulo apresenta-se os resultados da pesquisa e no quinto e último capítulo as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são abordados tópicos como a estrutura do pavimento, tipos e camadas dos pavimentos, comportamento e desempenho dos pavimentos flexíveis, mecanismos de degradação, componentes das misturas asfálticas (ligante, agregado) e suas propriedades, e ainda uma abordagem sobre as fibras vegetais como material de reforço nas misturas asfálticas.

### 2.1 Estrutura do Pavimento

Balbo (2007) define pavimento como uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas compactadas de diferentes materiais, sendo adequada para atender estrutural e operacionalmente o tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível.

Outro conceito com relação aos pavimentos, que vale a pena ressaltar, é encontrado na literatura de Bernucci et al. (2008, p.9), na qual define:

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplanagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

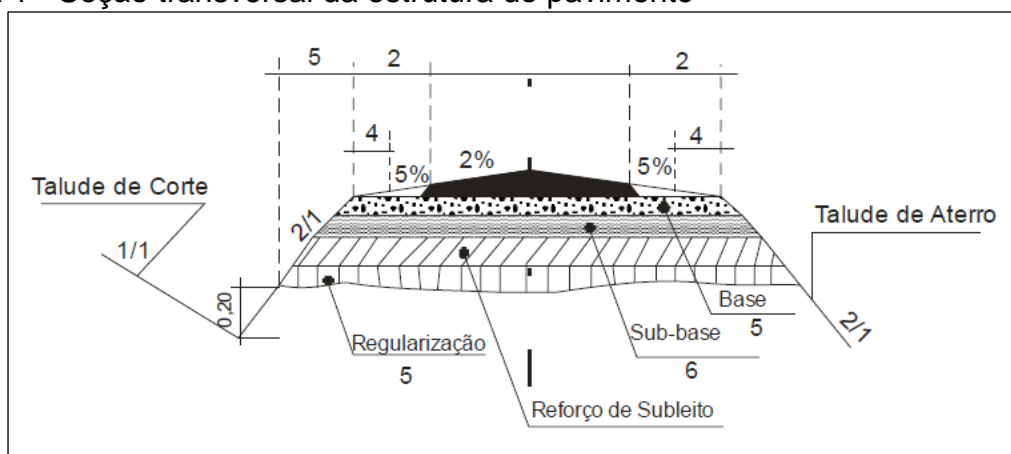
A função essencial de um pavimento rodoviário é garantir uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com conforto e segurança, sob a ação das ações do tráfego e nas condições climáticas em que se encontram. Assim, a um pavimento devem ser exigidos dois tipos de qualidades: a qualidade funcional, relacionada com o conforto e segurança de circulação e a qualidade estrutural, relacionada com a capacidade do pavimento a suportar as cargas dos veículos sem sofrer alterações aos valores limites estabelecidos (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2006).

Cada camada do pavimento é dimensionada para receber e transmitir esforços de maneira a aliviar as pressões sobre as camadas inferiores, que normalmente são menos resistentes. O pavimento é formado pelo revestimento, camadas de base, sub-base, reforço do subleito e subleito, sendo elas (BALBO, 2007):

- Revestimentos: A função dos revestimentos é receber as cargas, estáticas ou dinâmicas, sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação dos componentes ou perda de compactação, devendo ser composto de materiais bem aglutinados ou dispostos de modo a evitar sua movimentação horizontal;
- Bases e sub-bases: Podem ser divididas, por razões construtivas e econômicas, em duas camadas: base e sub-base, desempenhando um papel importante na drenagem superficial dos pavimentos e aliviando as pressões sobre as camadas de solos inferiores. As bases podem ser constituídas de solos estabilizados naturalmente, misturas de solos e agregados, brita graduada, concretos, entre outros. Para as sub-bases, podem ser utilizados os mesmos materiais da base.
- Reforços de subleitos: Utiliza-se reforço no subleito quando o solo do subleito apresentar pequena resistência aos esforços verticais de cisalhamento que ocorrem na superfície, diminuindo assim a espessura das camadas de base e sub-base;
- Subleitos: Os esforços impostos no subleito serão aliviados em sua profundidade, dispersos normalmente no primeiro metro. Nas camadas superiores é que os esforços solicitantes atuam com maior intensidade, devendo, assim, ter mais preocupação com as mesmas. Os materiais utilizados para o subleito são material natural consolidado e compactado;

A Figura 1 ilustra a seção transversal típica do pavimento rodoviário, contendo a camada de regularização, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento.

Figura 1 - Seção transversal da estrutura do pavimento



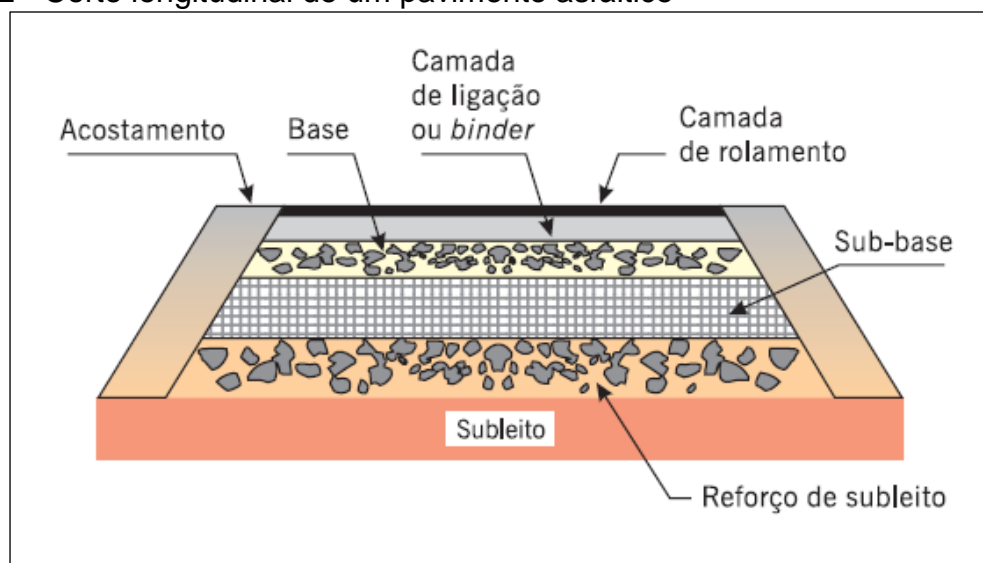
Fonte: DNIT (2006a, p. 106)

Conforme o Manual de Pavimentação do DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006a), os pavimentos rodoviários são classificados em três tipos, sendo eles:

- Flexível: Pavimento em que todas as suas camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado, onde que a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. É constituído por uma base de brita ou por uma base de solo pedregulhoso, revestido por uma camada asfáltica;
- Semirrígido: Caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias, citando como exemplo, uma camada de solo cimento revestida com uma camada asfáltica;
- Rígido: É o pavimento em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação as camadas inferiores, absorvendo os esforços aplicados.

Para Bernucci et al. (2008), os pavimentos flexíveis são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligante asfáltico, formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir às ações do tráfego, impermeabilizar o pavimento e além disso, melhorar as condições de rolamento. A Figura 2 apresenta o corte longitudinal de um pavimento flexível.

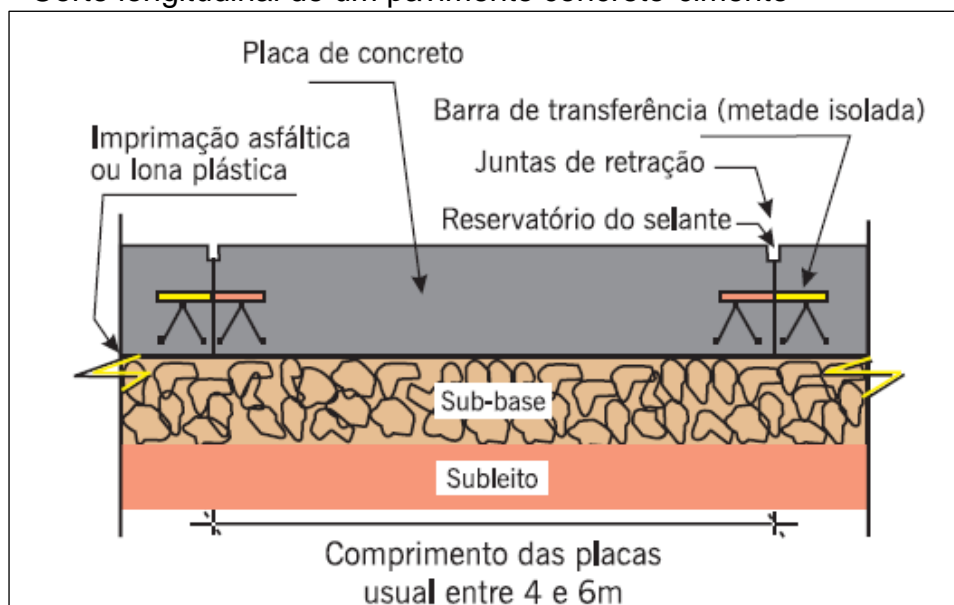
Figura 2 - Corte longitudinal de um pavimento asfáltico



Fonte: Bernucci et al. (2008, p. 10)

Quanto aos pavimentos rígidos, Bernucci et al. (2008), define que são pavimentos em que o revestimento geralmente é uma placa de concreto cimento Portland, onde as placas podem ser armadas ou não com barras de aço. A espessura desse tipo de pavimento é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das camadas subjacentes. A Figura 3 ilustra o corte longitudinal de um pavimento de concreto.

Figura 3 - Corte longitudinal de um pavimento concreto-cimento



Fonte: Bernucci et al. (2008, p. 10)

## **2.2 Comportamento e Desempenho dos Pavimentos Flexíveis**

O comportamento de um pavimento rodoviário é determinado pelas ações do tráfego e climáticas, pela sua constituição (número e espessura de camadas), pelas características dos materiais e, por último, as características das fundações (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2006).

Segundo Bernucci et al. (2008), os requisitos técnicos e de qualidade de um pavimento asfáltico serão satisfatórios com um projeto adequado da estrutura do pavimento e um projeto de dosagem da mistura asfáltica compatível com as outras camadas escolhidas.

O desempenho de pavimentos flexíveis pode ser entendido como o grau com que este atende as solicitações impostas ao longo de sua vida útil. O desempenho de determinado pavimento pode ser identificado de modo objetivo, analisando a sua condição atual e futura, definindo assim, as ações de prevenção e manutenção (GONÇALVES, 1999).

Quanto ao tipo de desempenho que os pavimentos flexíveis apresentam, o DNIT (2006b), salienta que o desempenho funcional se refere à capacidade que o pavimento tem de fornecer ao usuário uma superfície com adequadas condições de rolamento e o desempenho estrutural está subordinado à capacidade que o pavimento tem de não apresentar falhas significantes em sua estrutura.

Muitos são os indicadores que podem ser utilizados para quantificar o desempenho de um pavimento, considerando desde aqueles que caracterizam sua condição funcional até aqueles que consistem especificamente do registro de defeitos de superfície ou de deformações plásticas (GONÇALVES, 1999).

## **2.3 Mecanismos de Degradação dos Pavimentos Flexíveis**

Os pavimentos são projetados para durarem um determinado período de tempo, apresentando em sua fase inicial ótimas condições as quais gradativamente vão decrescendo com o passar do tempo até atingir uma condição inadequada. Esse processo de perda de eficiência do pavimento ao longo do tempo é conhecido como deterioração do pavimento (DNIT, 2006b).



Patologias funcionais, associadas à irregularidade presente na superfície do pavimento são assim denominadas por integrar a maior parcela do número de serventia, uma medida indicativa que o pavimento atende ao tráfego com conforto e segurança (BALBO, 2007).

Os mecanismos que controlam os processos de deterioração ou degradação estrutural dos pavimentos dependem do tipo da estrutura. Segundo Rodrigues (1991), os pavimentos asfálticos se deterioram por:

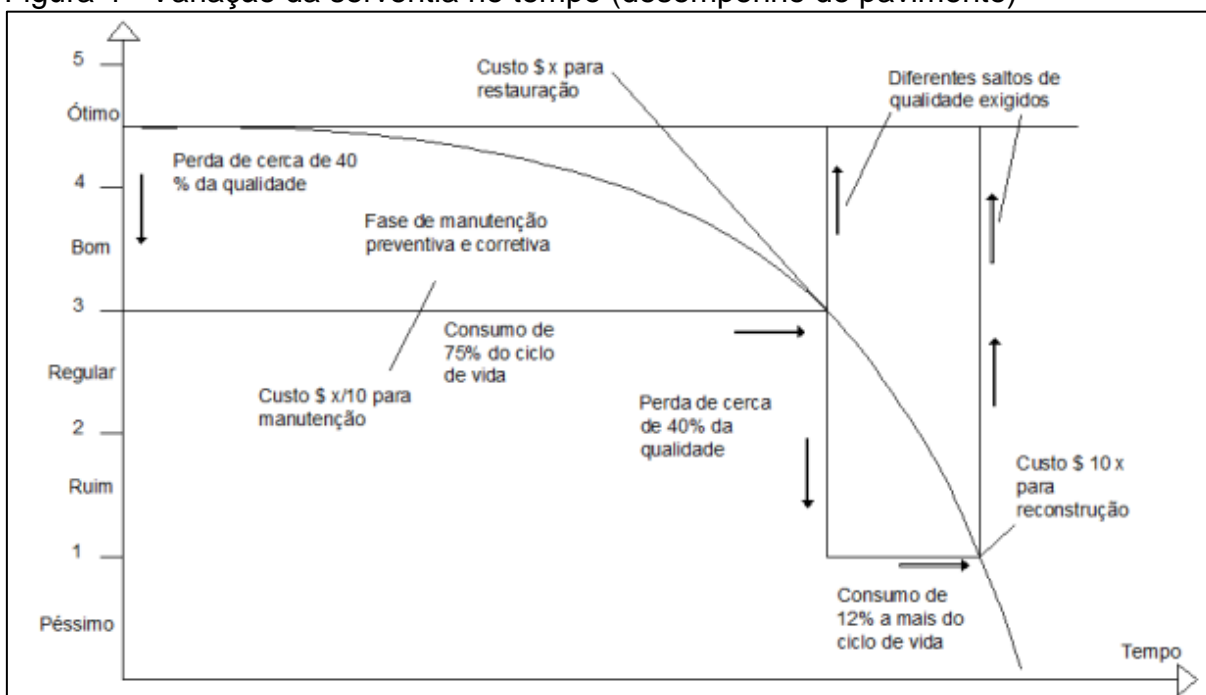
- Formação e crescimento de fissuras nas camadas de revestimento, consequentes da fadiga provocada pela repetição das cargas do tráfego;
- Geração de afundamentos em trilha de roda ou ondulações na superfície em decorrer do acúmulo de deformações plásticas nas camadas;
- Desgaste em decorrência da abrasão provocada pelos veículos;
- Envelhecimento do ligante betuminoso por oxidação.

No Brasil, o mecanismo dominante nas rodovias de tráfego é o trincamento por fadiga e o afundamento de trilha de roda. Nas vias urbanas, os afundamentos plásticos têm sido intensos, pois os pavimentos não atendem às exigências de espessura ou compactação preconizadas pelo método do projeto (NAKAHARA, 2005).

Os métodos de dimensionamentos existentes não levam em conta as propriedades elásticas das camadas superficiais. O método de projeto da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 1993), baseado no conceito serventia-desempenho, utiliza como parâmetro de cálculo a perda de serventia com o tempo. O valor de serventia está correlacionado com três tipos de defeitos: trincamento, remendo e nas irregularidades superficiais (NAKAHARA, 2005).

O método da AASHTO, adotou um critério de ruptura por serventia para definir as equações de desempenho de pavimentos. A qualidade do rolamento é avaliada em uma escala de 0 a 5 em relação ao tráfego acumulado ou ao tempo, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Variação da serventia no tempo (desempenho do pavimento)



Fonte: Balbo (2007, p. 259)

## 2.4 Misturas Asfálticas

Geralmente, o revestimento de pavimentos flexíveis é constituído por uma mistura de agregados e ligante asfáltico, denominada de mistura asfáltica, na qual pode ser produzida a quente ou frio, em decorrência do tipo de ligante asfáltico utilizado e da temperatura da mistura. Em função da granulometria dos agregados, as misturas asfálticas podem ser: contínuas (densas) ou descontínuas - densas ou abertas (JÚNIOR et al., 2006).

O desempenho das misturas asfálticas depende tanto das propriedades dos seus componentes individuais quanto da relação entre o ligante e o agregado (NEVES, 2004).

Conforme Júnior et al. (2006) a mistura mais utilizada em pavimentos asfálticos no Brasil é o CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), uma mistura contínua densa executada em uma usina apropriada, composta de agregados minerais graduados, material de enchimento (fíler) e cimento asfáltico, espalhada e compactada a quente.

Para que o pavimento ofereça as condições em que foi concebido, os materiais que constituem as camadas de pavimento devem ter determinadas propriedades afim

de garantir um bom desempenho nas misturas asfálticas (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2006).

Branco, Pereira e Santos (2006) evidenciam que as misturas betuminosas devem atender ao desempenho de funções relacionadas com a segurança e o conforto dos usuários da via. Enumera as características que devem ser exigidas das misturas betuminosas, garantindo determinados critérios de economia, durabilidade e facilidade de execução, nas quais são:

- Estabilidade: A estabilidade consiste em obter uma mistura com capacidade adequada para resistir, com uma pequena deformação, às cargas sujeitas em serviço. Esta propriedade vai depender particularmente do atrito interno dos materiais e da sua coesão;

- Durabilidade: A durabilidade de uma mistura pretende caracterizar sua resistência à desintegração causada pelas solicitações climáticas e pelo tráfego. Em geral, quanto maior a quantidade de betume utilizado, maior será a durabilidade da mistura, como também, a utilização de materiais de granulometria contínua, bem compactados, resultando em misturas impermeáveis e melhorando a durabilidade;

- Flexibilidade: Está relacionada com a capacidade de se adaptar aos movimentos do seu suporte. É uma característica importante visto que algumas zonas do pavimento tendem a comprimir-se sob a ação do tráfego e assim, misturas com suficiente flexibilidade, evitam fendilhamento do pavimento;

- Resistência à fadiga: a fadiga nos pavimentos é um fenômeno originado pela passagem repetida de veículos, resultando em trincas ou até fratura completa;

- Aderência: É importante escolher agregados com textura superficial rugosa e que tenham uma boa resistência ao desgaste e além do mais, é conveniente não utilizar betume em excesso, garantindo assim que a superfície não seja demasiadamente lisa;

- Impermeabilidade: Uma mistura deve oferecer uma boa resistência à passagem da água e do ar através das camadas do pavimento;

- Trabalhabilidade: Além da produção de materiais com características desejadas é de suma importância que esse material possa ser colocado e compactado com facilidade.

### 2.4.1 Agregados

Segundo Balbo (2007), agregados são um conjunto de grãos minerais, dentro de um determinado limite de dimensão, naturais ou artificiais, que podem ser britados ou não. Dentre suas principais finalidades, pode ser destacado o uso na construção civil, principalmente na fabricação de argamassas e concretos asfálticos, como também, utilizado em misturas estabilizadas com ligantes.

Em relação a pavimentação asfáltica, os agregados compõem em uma ordem de 90 a 95% do seu peso, correspondendo a valores de 75 a 85% do seu volume. Podem classificar-se de vários modos, dependendo do ponto de vista a considerar: petrográfico, massa volúmica, baridade, modo de obtenção e dimensão das partículas (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2006).

Para a fabricação de misturas asfálticas, os agregados são tratados em termos de faixas de determinados diâmetros, conforme a Tabela 1 apresentada abaixo:

Tabela 1 - Diâmetros e denominações de pedras britadas

Denominação	Faixa de diâmetro (mm)
Pó-de-pedra	< 2,4
Pedra 0 ou pedrisco	entre 2,4 e 9,5
Pedra 1	entre 9,5 e 19,0
Pedra 2	entre 19,0 e 38,0
Pedra 3	entre 38,0 e 76,0

Fonte: Balbo (2007, p.100)

Pinto e Pinto (2015) ressalta que a granulometria do agregado, representada pela curva de distribuição granulométrica, é uma das características que garantem a estabilidade do pavimento, em decorrência do maior atrito interno obtido pelo entrosamento das partículas, considerando-se das mais graúdas até as mais finas.

Outra característica importante que um agregado deve apresentar para ser usado em revestimentos asfálticos é uma boa adesividade, ou seja, que não haja deslocamento da película betuminosa pela ação da água (PINTO; PINTO, 2015).

Já Bernucci et al. (2008) destaca que o agregado escolhido para uma determinada utilização deve ter propriedades que venham a suportar as tensões impostas na superfície do pavimento e no seu interior.

## **2.4.2 Ligante Asfáltico**

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem. Na maioria dos países do mundo, a pavimentação asfáltica é considerada a principal forma de revestimento. No Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico (BERNUCCI et al., 2008).

O asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e apresenta a propriedade de ser pouco reativo, impermeável e um bom adesivo termoviscoplastico (BERNUCCI et al., 2008).

De acordo com Pinto e Pinto (2015), os asfaltos devem apresentar uma boa resistência à oxidação na obscuridade, podendo até oxidar em um espaço curto de tempo na superfície, evitando assim problemas de derrapagem. A diferença de oxidação está no fato de que os asfaltos serem constituídos basicamente de núcleos hidrocarbonetos aromáticos, onde não absorvem oxigênio na obscuridade, porém, na luz, são muitos reativos.

Em serviços de pavimentação são utilizados os seguintes materiais betuminosos: cimentos asfálticos, asfaltos diluídos e emulsões asfálticas (PINTO; PINTO, 2015).

### **2.4.2.1 Cimentos Asfálticos**

Os Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) são obtidos a partir de processos de refinamento do petróleo cru. São materiais que apresentam uma grande quantidade de betume (hidrocarbonetos não voláteis pesados), com cor escura, muito viscoso e agindo como ligante, de consistência sólida a semissólida em temperatura ambiente (BALBO, 2007).

Segundo Pinto e Pinto (2015), o Cimento Asfáltico Petróleo é classificado pelo grau de dureza retratado no ensaio de penetração ou viscosidade, e para ter uma consistência apropriada ao envolvimento dos agregados precisa de aquecimento. Quanto as suas características, apresentam flexibilidade, durabilidade, impermeabilização e elevada resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis.

## 2.5 Utilização de Fibras como Material de Reforço

A utilidade de fibras em compósitos é uma alternativa que vem sendo utilizada a anos, inclusive há relatos que demonstram que essa técnica já era utilizada por volta do ano 3500 A.C., com a fabricação de tijolos com adição de palhas e cozidos ao sol (LEAL, 2013). Outro exemplo histórico era o emprego de crina de cavalo ou palha nas construções mais pobres para evitar fissuras de retração (SARZALEJO et al., 2009).

Dobbin e Rocha (2011, p.16) conceituam as fibras:

A fibra é um material fino, fibrilado e alongado. Na natureza, as fibras podem ser encontradas inclusive nos seres vivos, pois são elas que fazem o sustento dos tecidos. Elas podem ser aproveitadas para diversas finalidades, dependendo da sua origem e composição. Podem ser encontradas fibras naturais, artificiais e sintéticas. As naturais são as fibras encontradas prontas na natureza, as artificiais são produzidas pelo homem através das materiais da natureza e as sintéticas são também produzidas pelo homem, porém, oriundas de produtos químicos.

A utilização de fibras em produtos asfálticos tem ocorrido há muito tempo, como materiais impermeáveis e filers em placas de concreto. No entanto, somente nos últimos 20 anos que começou o uso na pavimentação, apresentando resultados satisfatórios em categoria de industrialização. Dos mais variados tipos de fibras utilizadas, destacam-se as naturais (asbestos e celulose) e as industrializadas - sintéticas e inorgânicas e metálicas (HOMEM, 2002).

No que se refere o uso de fibras como material de reforço em pavimentos flexíveis, ainda precisa ser bastante explorado. De fato, os estudos que existem nessa área são em relação a misturas asfálticas do tipo SMA (Stone Matrix Asphalt), que consiste basicamente de uma fração de agregado graúdo e outra de um elevado teor de mastique, constituído basicamente por agregado miúdo, fíler mineral, ligante asfáltico e fibras (VASCONCELOS, 2004).

O SMA surgiu na Alemanha na década de 60, sob a denominação de Splittmastixasphalten, com o intuito de amenizar o desgaste causado pelos pneus aos revestimentos asfálticos, durante o inverno e depois passou a ser denominado de Stone Mastic Asphalt e Stone Matrix Asphalt, quando conquistou outros países do continente europeu. Mas somente aos anos 90 que o SMA passou a ser utilizado nos Estados Unidos e por volta do ano 2000 chegou na América do Sul, com utilizações

na Argentina, Brasil e Chile. No Brasil, a primeira aplicação foi como revestimento no autódromo de Interlagos (LEAL, 2013).

A constituição do SMA é composta de 70% de agregado graúdo, propiciando uma boa otimização de contato grão a grão e aumentando o desempenho estrutural da camada de rolamento, particularmente em relação às deformações permanentes. O teor de ligante varia de 6 a 8%, reduzindo sensivelmente o envelhecimento do pavimento. Constitui, assim, de uma mistura de alto desempenho que pode ser aplicada em rodovias de grande volume de tráfego, corredores de ônibus, cruzamentos, aeroportos e estacionamentos (LEAL, 2013).

Segundo Hagos (2008), umas das grandes vantagens do uso de fibras nas misturas asfálticas são a promoção de maior resistência ao envelhecimento em decorrer do maior filme de ligante, e a prevenção do escorrimento do mástico, evitando assim, a exsudação. Outra razão de utilização da fibra é a prevenção do aparecimento de trincas no mástico, como resultado da ação do tráfego, essencialmente a baixas temperaturas.

Hagos (2008) enumera as características que as fibras devem conter para a aplicação em misturas asfálticas:

- As fibras devem ser resistentes e de tamanho apropriado para formar uma malha no interior da mistura asfáltica. Se a fibra for muito curta, deixa de prevenir o aparecimento de trincas. No entanto, se a fibra for muito longa pode causar problemas na mistura;
- As fibras devem ser dúcteis para garantir uma boa resistência aos esforços intermitentes do tráfego;
- As dimensões da fibra, comprimento e largura, também é um fator preponderante, interferindo na aderência entre fibra e ligante.

Para Casagrande (2005), a posição da fibra em relação ao plano de ruptura, ou fissura, influencia diretamente na sua capacidade em transmitir cargas. Assim, se uma fibra adicionada a matriz de um compósito estiver disposta perpendicularmente ao plano de ruptura terá efeito máximo. Caso contrário, não terá efeito nenhum. Ressalta, ainda, algumas características importantes na escolha da fibra que será utilizada para reforço de material. Entre elas:

- A fibra deve ser quimicamente neutra e não deteriorável;

- Não sofrer ataques de fungos, bactérias ou álcalis;
- Não ser prejudicial à saúde humana;
- Apresentar características físicas e químicas adequadas.

O efeito das fibras nas misturas asfálticas vai depender das suas características. Algumas possuem efeito a curto prazo, não permitindo escorrimento do ligante, enquanto outras a longo prazo, influenciando nas propriedades mecânicas e a durabilidade da mistura asfáltica. Usualmente as fibras, em usinas asfálticas, são adicionadas antes da inclusão do asfalto, em torno de 1% para fibras minerais e 0,3 a 0,5% para fibras de celulose (HOMEM, 2002).

Outra propriedade relevante a ser estudada é a aderência entre a fibra e a mistura asfáltica. A adesão inadequada entre as fases envolvidas poderá provocar um início de falhas e comprometimento da mistura. Por esse motivo, muitas vezes realiza-se um tratamento superficial para aumentar a aderência entre a fibra e a mistura asfáltica.

Em relação a sua composição, Homem (2002) classifica as fibras em naturais e industrializadas. Como exemplos de fibras naturais: os asbestos e celulose e de fibras industrializadas: as sintéticas (poliéster, polietileno, polipropileno e acrílico) e as inorgânicas (aço, vidro e minerais).

Para Casagrande (2005), as fibras poliméricas são muito promissoras no emprego como reforço de solos, pois de acordo com a estrutura dos polímeros, estes apresentam distintos comportamentos e combinações, fazendo com que surjam diferentes tipos de fibras.

As fibras poliméricas são derivadas dos polímeros orgânicos, resultantes de pesquisas petroquímicas e têxtil. Destacam-se na área de estudo da engenharia as fibras de nylon, aramida, poliéster, polietileno e polipropileno (PASA, 2007).

As fibras de polipropileno são constituídas de um material polimérico chamado de termoplástico. Os polímeros termoplásticos são constituídos por uma série de longas cadeias de moléculas polimerizadas, onde todas as cadeias são separadas e podem deslizar sobre as outras (HOLLAWAY, 1994 apud HOMEM, 2002).

No estudo elaborado por Casagrande (2005), utilizando fibras de polipropileno como matéria de reforço em solos, obtiveram-se resultados bem satisfatórios, apresentando melhorias nas propriedades do material.



As fibras de aço, segundo Homem (2002), são relativamente grossas, possuindo 300  $\mu\text{m}$  de diâmetro, resistência à tração de aproximadamente 1100 MPa e módulo de elasticidade de 200 GPa. Em pavimentação asfáltica, a utilização de fibras de aço não é usual.

Já as fibras de vidro podem ser empregadas na pavimentação, usualmente empregadas com um diâmetro de 6  $\mu\text{m}$  e comprimento variando entre 1 e 10 mm, onde são geralmente manufaturadas em forma de “cachos”, ou seja, fios compostos de muitos filamentos individuais justapostos (HOMEM, 2002).

### **2.5.1 Fibras Vegetais**

Segundo Leão (2008), as fibras naturais podem ser classificadas em vegetais, animais e minerais. Todas as fibras vegetais, como o algodão, juta e sisal, por exemplo, possuem celulose em sua composição, enquanto as fibras de origem animal, lã e seda, constituem-se basicamente de proteínas.

Podem ser obtidas a partir de sementes, caules (talos, denominados de fibras moles), folhas (chamadas de fibras duras), frutos, onde a celulose é o material responsável para a construção das fibras celulares, e até mesmo raízes (FINKIELSZTEJN, 2006). As fibras que são obtidas do caule são: juta, malva, bagaço de cana-de-açúcar e bambu; das folhas: sisal, bananeira, abacaxi e curará; do fruto são obtidas: algodão, coco verde e maduro; e do tronco, a madeira, entre outros (BRANDÃO, 2015).

As fibras vegetais são constituídas por células individuais, que se dividem em microfibrilas dispostas em camadas de diferentes espessuras e ângulos de orientação. As microfibrilas são ricas em celulose, polímero vegetal de cadeias longas e estão aglomeradas por hemicelulose amorfa (AGOPYAN; SAVASTANO JR, 1998).

Por conta de sua composição química, as fibras vegetais também podem ser chamadas de lignocelulósicas, pois possuem como componentes principais substâncias polares como: celulose, lignina e hemicelulose (GUIMARÃES, 2014). Tais componentes estão dispostos na fibra em uma complexa estrutura física (BENINI, 2011).

Assim, o conhecimento desses componentes, descritos em porcentagens em alguns exemplos de fibras vegetais na Tabela 2, e a forma como estão inseridos na

estrutura da fibra é de extrema importância no desenvolvimento do uso de fibras como reforço em compósitos (BENINI, 2011).

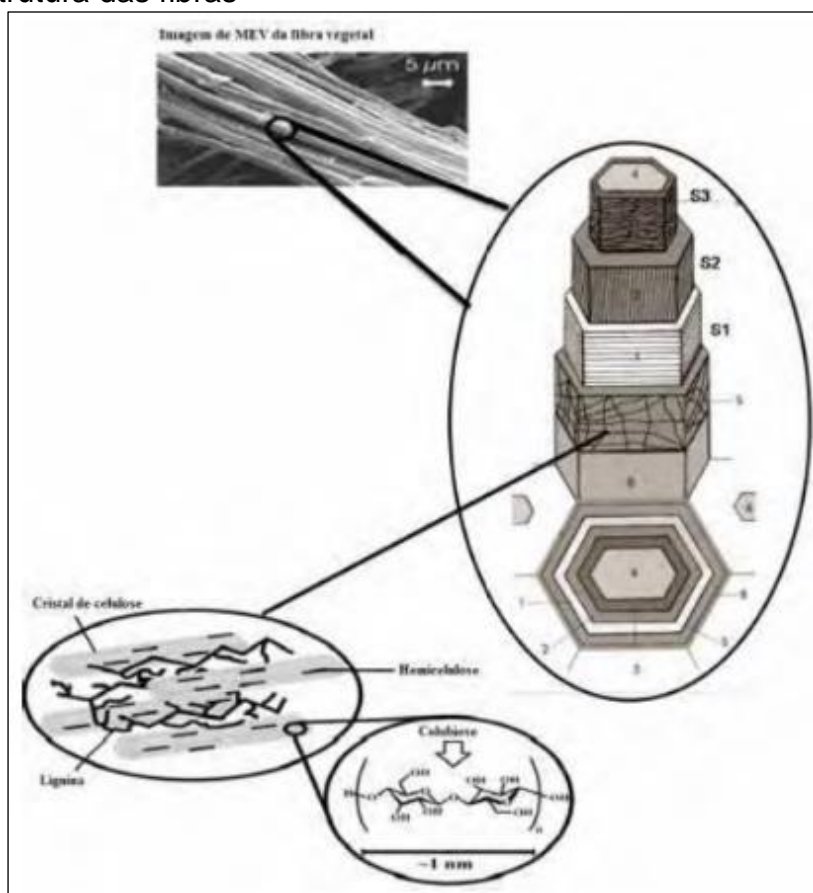
Tabela 2 - Composição química de algumas fibras naturais (%)

<b>Fibra</b>	<b>Celulose</b>	<b>Hemicelulose</b>	<b>Lignina</b>
Piçava	29	11	45
Bagaço	48	22	20
Bambu	35	15	27
Cana	45	20	23
Linho	60	16	4
Juta	60	15	16
Cânhamo	67	16	8
Rami	69	13	1
Cânhamo de manilha	63	20	6
Sisal	60	12	10
Madeira	45	22	25

Fonte: Aquino (2003, p. 50)

De acordo com a Figura 5, cada fibra é composta por um lúmen central cercado por camadas de fibrilas e microfibrilas. O lúmen, que é responsável por transportar água e nutrientes na planta, é cercado por uma parede primária, três paredes secundárias (S1, S2, S3) e uma parede intermediária (BENINI, 2011).

Figura 5 - Estrutura das fibras



Fonte: Benini (2011, p. 23)

A resistência à tração e o módulo de elasticidade são diretamente proporcionais ao teor de celulose e inversamente proporcional ao ângulo das microfibrilas. No entanto, o alongamento máximo de ruptura aumenta com o ângulo, uma vez que é maior o trabalho de fratura necessário para o estiramento das microfibrilas (CHAND et al., 1988 apud BEVITORI, 2014).

Para analisar a viabilidade da aplicação de fibras em diferentes usos, é necessário que sejam coletados dados como: dimensão das partículas, relação entre o comprimento e diâmetro das fibras, volume de vazios (que pode proporcionar um menor peso na estrutura, porém, alta absorção de água), módulo de elasticidade, resistência à tração, alongamento na ruptura, durabilidade, custos (COLETTI, 2009).

Vale ressaltar também, que as características das fibras vegetais podem variar conforme a espécie, região de cultivo, condições climáticas, tipos de solo, e a fase de crescimento da planta, entre outros (LEÃO, 2008).

Na Tabela 3 são apresentadas algumas propriedades físicas e químicas de algumas fibras naturais comparadas a outras fibras convencionais.

Tabela 3 - Propriedades físicas e mecânicas de fibras naturais

<b>Fibra</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Ângulo Microfibrilar (θ)</b>	<b>Módulo Elástico GPa)</b>	<b>Tensão Máxima (MPa)</b>	<b>Alongamento de Ruptura (%)</b>
<b>Bagaço de Cana</b>	0.45-0.49	-	27.1	222	1.1
<b>Juta</b>	1.45	7-17	27-32	400-800	1.5-1.8
<b>Rami</b>	1.50	7.5-12	44	500-870	1.2
<b>Piaçava</b>	-	-	1.07-4.59	108-147	6.4-21.9
<b>Curauá</b>	0.92	18.8	30-80	1250-3000	4-5.6
<b>Sisal</b>	1.26-1.33	20	17-22	324-630	2-5.1
<b>Coco</b>	1.25-1.50	30-51	2.5-6	95-220	13-51.4
<b>E-Vidro</b>	2.5	-	70	2000-3500	2.5
<b>Aramida</b>	1.4	-	63-67	3000-3150	1.4

Fonte: Satyanarayana (2007, apud Paula, 2011, pg. 13)

O emprego das fibras vegetais não é algo novo, sabe-se que o linho era cultivado pelo homem há três mil anos a.C., na Europa, e o cânhamo e o rami, na China, mais ou menos nessa época (AQUINO, 2003).

Nas últimas décadas, a utilização de fibras vegetais foi muito significativa, devido ao fato de serem provenientes de fontes de energia renováveis, biodegradáveis e além do mais, ter baixo custo.

As fibras vegetais atuam como matéria-prima de excelente qualidade, sendo utilizada de diversas maneiras em diferentes níveis de produção. Sua utilização engloba desde a indústria alimentícia até as indústrias: automobilísticas, de aviação e da construção civil, com a produção de compostos poliméricos e cimentícios (ESTEVES, 2009).

Fazendo uma comparação com fibras sintéticas, as vegetais apresentam as seguintes vantagens: baixa densidade, fonte abundante, menor abrasividade, baixo custo, não tóxicas e totalmente biodegradáveis (BLEDZKI, 1999).

Já Esteves (2009), enumera as seguintes desvantagens das fibras vegetais em relação às sintéticas:

- Temperatura de processamento limitada (200 – 300 °C) para evitar a consequente perda de cor e a redução das propriedades mecânicas do compósito;
- Elevada capacidade para absorção de umidade;

- Qualidade variável em decorrer das influências imprevisíveis como as condições climáticas, o que influencia diretamente nas propriedades físicas e mecânicas das fibras.

### 2.5.1.1 Capim Anonni

O Capim Anonni (*Eragrostis Plana* Nees) é uma gramínea originária da África, encontrada em solos pobres e considerada como planta invasora (HALL, 1977).

Essa planta foi introduzida da África para o Estado do Rio Grande do Sul por volta da década de 1950, com objetivo forasteiro. Existem relatos em que a espécie foi pela primeira vez percebida no estado em 1951 pelo Senhor Ernesto José Annoni, em uma fazenda de sua propriedade, no município de Sarandi, na qual originou-se o nome da espécie. Outra versão, é que o capim anonni apareceu primeiro na Estação Experimental Zootécnica de Tupanciretã e somente depois que foi observado em Sarandi (REIS, 1993).

Conforme Hall (1997), a maneira como a espécie chegou ao estado é incerta, provavelmente foi acidentalmente introduzida como espécie contaminante em sementes de capim de rhodes (*Chloris gayana* kunth) e de capim charão (*Eragrostis curvula* (Schrader) Nees), provenientes da África do Sul.

Nos anos 70, começou as investigações a respeito da sua qualidade nutricional, foram realizadas avaliações agrônômicas e de seu uso como forrageira para animais de pastejo. Após a avaliação, essa espécie mostrou-se inapta para a utilização do pastejo em virtude da sua baixa qualidade nutricional e a elevada resistência à tração mecânica, resultando baixa produção animal (ALFAYA et al., 2002).

Quanto a sua morfologia, o capim anonni forma touceiras fortemente enraizadas, podendo alcançar, quando florescidas, 110 centímetros de altura, reproduzindo-se pela ampliação lateral dessas touceiras (FOCHT, 2008).

Conforme Reis (1993), a principal forma de dispersão do capim é por sementes, onde as principais fontes de disseminação são estradas vicinais, rodovias e ferrovias, locais de concentração de animais e os principais agentes de disseminação são os animais (bovinos, equinos, pássaros), veículos automotores e agrícolas, vento e por via pluvial, em que o processo de invasão e dominação pode levar algum tempo para ocorrer.

Considerada como uma planta hostil e de difícil controle na agricultura, é responsável por infestar aproximadamente 20% da vegetação dos campos da região Sul do país, equivalendo a um espaço de 3,1 milhões de hectares, sendo um único indivíduo responsável por gerar em torno de 300 mil sementes (GOULART et al., 2009).

Nos dias de hoje, essa espécie é um grande equívoco, uma grande ameaça ao pampa gaúcho. Por isso, tem-se realizado inúmeras pesquisas com o objetivo de combater a dispersão dessa gramínea.

Não existem pesquisas a respeito da utilização do capimannoni como matéria-prima em indústrias ou como utilização na construção civil. Faz parte da pesquisa estudar as propriedades (resistência à tração, módulo de elasticidade, umidade e absorção) dessa planta e a viabilidade de sua aplicação como material de reforço em misturas asfálticas. A Figura 6 mostra o vegetal in loco.

Figura 6 - Capimannoni



Fonte: Ferreira (2011, p.30)

### 2.5.1.2 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta originária do sudeste da Ásia, cultivada em países tropicais e subtropicais, que foi trazida ao Brasil pelos portugueses, passando a ter uma significativa importância para o país. Utilizada para a produção de álcool e açúcar, seu primeiro polo de produção foi a Zona da Mata nordestina, expandindo-se

depois para a região sudeste, particularmente no estado de São Paulo (KAWABATA, 2008).

Muitos são os fatores que podem influenciar na composição química da cana-de-açúcar, como por exemplo o clima, região de cultivo, solo, variedade da cana, adubação, entre outros, apresentando assim uma composição química bastante variável quantitativamente (BORLINI, 2006).

Os principais resíduos da produção da cana-de-açúcar são a palha e o bagaço. O bagaço, Figura 7, é um resíduo lignocelulósico fibroso, restante dos colmos de cana-de-açúcar, constituindo de partículas de diferentes tamanhos, variando entre 1 e 25 mm de comprimento, apresentando um tamanho médio de 20 mm (SOUZA, 2012). No Brasil são produzidos aproximadamente 132 milhões de toneladas de bagaço por ano. Desse total, uma quantidade é utilizada para a geração de energia dentro da própria usina, porém, estima-se que 20% do bagaço de cana ainda não recebe a destinação adequada (LEAL, 2010).

A principal destinação da cana-de-açúcar cultivada no Brasil é a fabricação de açúcar e álcool, porém, o bagaço vem sendo estudado e está ganhando novas aplicações.

Conforme a Pesquisa da Fapesp (2011), o bagaço da cana tem sido utilizado como aditivo estabilizante nas misturas de asfalto do tipo SMA, que por sua resistência é destinado em vias de tráfego intenso, aeroportos e autódromos, substituindo a fibra de celulose obtida da madeira.

Figura 7 - Bagaço de cana-de-açúcar



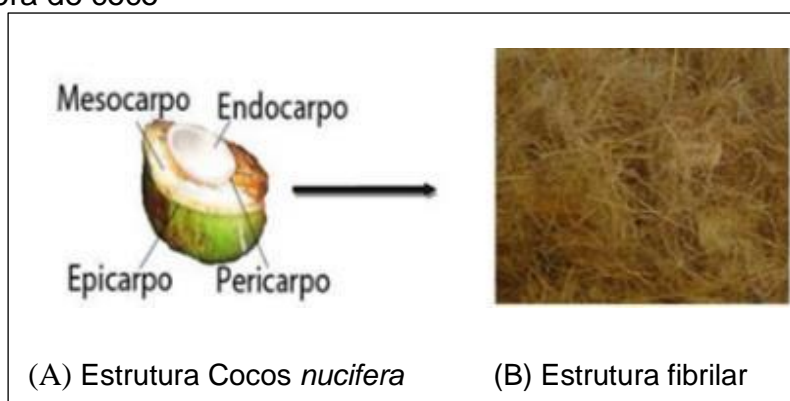
Fonte: Ciclo Vivo (2013, não paginado)

### 2.5.1.3 Coco

O coqueiro (*Cocos nucifera* L.) é uma palmeira do gênero *Cocos*, muito presente na paisagem nordestina. No Brasil, existem muitas espécies cultivadas, entre elas, espécies altas, as mais comuns, que chegam a atingir 40 metros de altura, e o coqueiro-anão, uma espécie de frutificação precoce e crescimento lento (VALE, 2007).

O fruto do coqueiro, o coco, Figura 8, é composto por uma parte externa lisa (o exocarpo), por uma parte fibrosa e espessa (mesocarpo) e por uma casca duríssima e lenhosa (endocarpo). Para a obtenção da fibra de coco, o processo de desfibração do mesocarpo (onde a fibra é extraída) pode ser feito por maceração em água ou por processos mecânicos (ESMERALDO, 2006).

Figura 8 - Fibra de coco



(A) Estrutura *Cocos nucifera*

(B) Estrutura fibrilar

Fonte: Leão (2012, p. 8)

Segundo Fagury (2005), as fibras de coco apresentam um comprimento entre 150 e 300 mm, existindo três tipos principais de fibras: a mais longa, que é utilizada como fibra branca, na fabricação de cordas e esteiras; uma fibra mais grossa, utilizada na fabricação de capachos; e uma fibra mais curta que é usada no enchimento de colchões.

Utilizada há várias décadas como um produto isolante, a fibra de coco tem hoje muitas aplicações. A fibra, em forma de manta, é um excelente material para ser utilizado em superfícies sujeitas à erosão provocada pela ação do vento ou da chuva, como também, em taludes nas margens de rodovias e ferrovias, em áreas de reflorestamento, parques urbanos e em qualquer área de declive acentuado ou de ressecamento rápido. Dentre suas principais características, destaca-se por possuir grande durabilidade, baixa densidade, grande percentual de alongamento, valores



pequenos de resistência à tração e módulo de elasticidade, baixo teor de celulose, elevado ângulo espiral quando comparada a outras fibras naturais, conferindo, assim, um comportamento diferenciado (CARVALHO, 2009).

#### 2.5.1.4 Sisal

O sisal, Figura 9, é uma planta originária do México, a *Agave Sisalana Perrine*, altamente resistente a clima seco e inóspido, pertencendo a família das fibras longas, com suas fibras variando de 90 a 120 cm (LEÃO, 2008).

A difusão da planta no Brasil ocorreu por volta da década de 20, no estado da Paraíba, difundindo-se para a Bahia, no final da década de 30. Atualmente, o Brasil é o maior produtor de sisal do mundo e a Bahia responsável por 80% da produção da fibra nacional (AQUINO, 2003).

Dentre suas principais aplicações, Leão (2008), destaca a importância das fibras de sisal na indústria automobilística, substituindo as fibras de vidro e sua utilização na confecção de produtos artesanais, tais como, bolsas, chapéus, cortinas, tapetes, produção de estofados e adubos orgânicos.

Figura 9 - Planta de sisal



Fonte: Agência USP (2001, não paginado)

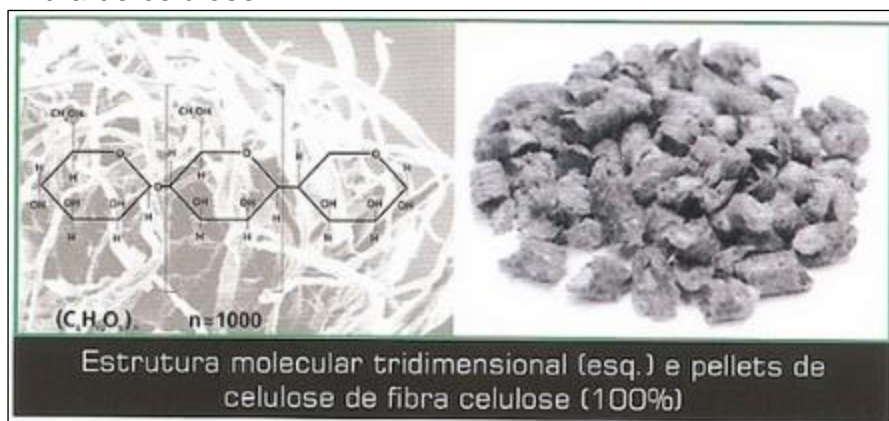
#### 2.5.1.5 Celulose

A fibra de celulose, Figura 10, é constituída de filamentos individuais unidos por lignina e hemicelulose. A forma mais comum de se obter a fibra de celulose é através da polpação da madeira, que consistem em quebrar ligações de éter, de modo a obter fragmentos menores, facilmente dissolvidos no processo químico (VALE, 2007).

No Brasil, a produção pode ser encontrada em qualquer região, produzida a partir de diversos tipos de espécies vegetais, podendo ser plantas vegetais ou madeira, dependendo da disponibilidade da região (SILVA 2002).

Em misturas asfálticas como o SMA e camada porosa de atrito (CPA), a fibra de celulose desempenha uma função importante no quesito de controlar as características de escorrimento dessas misturas (VALE, 2007).

Figura 10 - Fibra de celulose



Fonte: Sinicesp (2013, não paginado)

### 2.5.1.6 Rami

O rami, Figura 11, é uma planta da família da *Urticaceae* e a sua fibra é proveniente do líber da *Boehmeria Nivea* e da *Boehmeria Tenacissima*. Suas fibras pertencem a família das fibras longas, tendo em média de 150 a 200 milímetros de comprimento, apresentando uma alta resistência quando comparada ao cânhamo, três vezes superior; ao linho, quatro vezes e ao algodão, cerca de 8 vezes superior (LEÃO, 2008).

A utilização da fibra do rami é bem ampla, podendo ser utilizada para a fabricação de tecidos, cordas e barbantes, como também, para gerar celulose para a produção de papel moeda, devido a sua alta resistência. Além disso, o rami pode ser empregado na fabricação de mangueiras, pneus, fios de paraquedas, entre outras aplicações (AQUINO, 2013).

Figura 11 - Planta de rami



Fonte: Sobreira (1986, não paginado).

### 2.5.1.7 Juta

A juta é uma planta da família das *Filáceas* e sua fibra é obtida essencialmente da espécie *Corchorus*, bastante cultivadas na Índia e Bangladesh. No Brasil, o seu plantio ocorre na região alagadiça da Amazônia, pois essa planta, de clima quente e úmido, necessita de um solo fértil e bem drenado para o seu desenvolvimento (LEÃO, 2008).

Conforme Gonçalves et al. (2003), as fibras de juta são longas e alcançam entre 150 e 300 cm, obtidas por mercerização do caule em água, durante um período que varia de 12 a 25 dias. A tensão e a elasticidade das fibras são baixas, quando comparadas a outras fibras, mas isso se torna vantajoso para a fabricação de sacos, pois significa que eles manterão sua forma quando carregado. A Figura 12 mostra as fibras de juta.

Figura 12 - Planta de juta



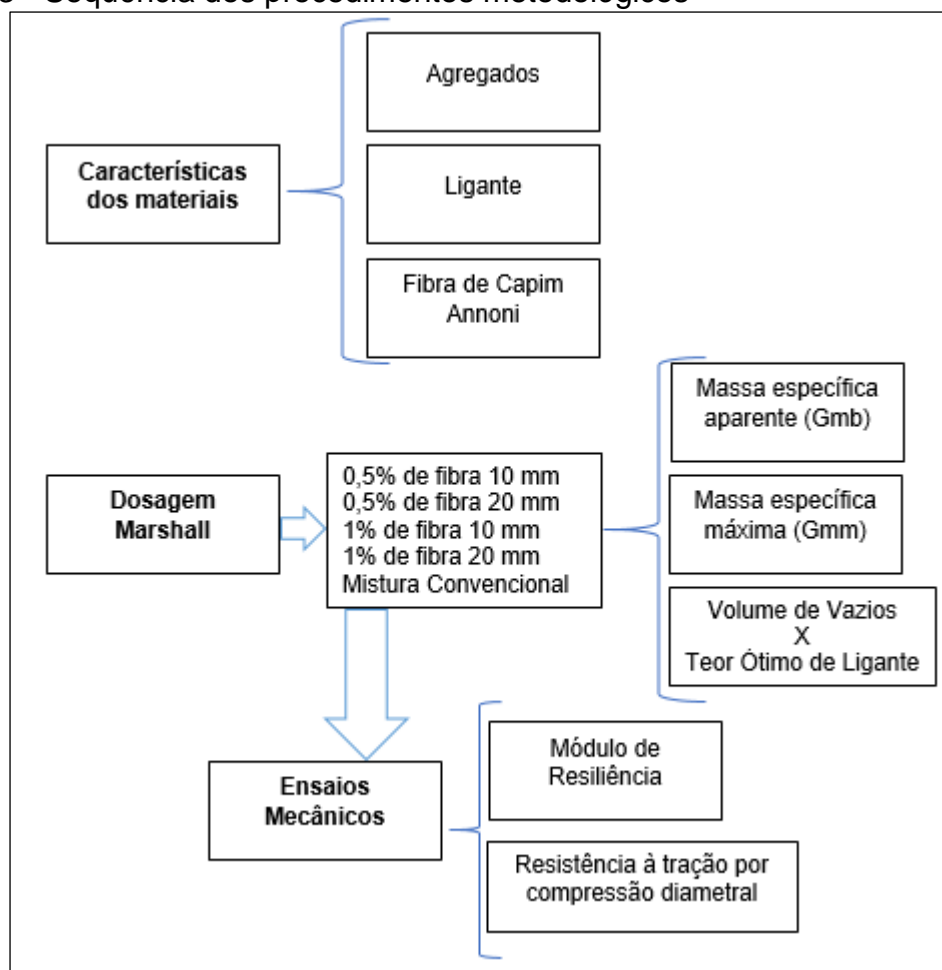
Fonte: Agência Fapeam (2016, não paginado)

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa de misturas asfálticas com adições de fibras vegetais.

A Figura 13 mostra a esquematização dos procedimentos metodológicos realizados para a obtenção dos objetivos propostos.

Figura 13 - Sequência dos procedimentos metodológicos



Fonte: elaboração própria

#### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa foram: agregados (brita 1, brita 0 e pó de pedra), ligante asfáltico (CAP 50/70) e as fibras vegetais (Capim Annoni) que serão adicionadas a mistura.

### 3.1.1 Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa são provenientes de rochas basálticas, obtidos da Pedreira Pedra Rosada, localizada próxima a BR-290, no município de Alegrete – RS. Estes foram submetidos aos ensaios de massa específica e absorção conforme regulamentam as normas DNER-ME 081/98 e DNER-ME 194/98 e obtiveram como resultado uma massa específica média de 2,727 g/cm<sup>3</sup> e absorção de 2,01% para o agregado graúdo e para o agregado miúdo massa específica de 2,817 g/cm<sup>3</sup>.

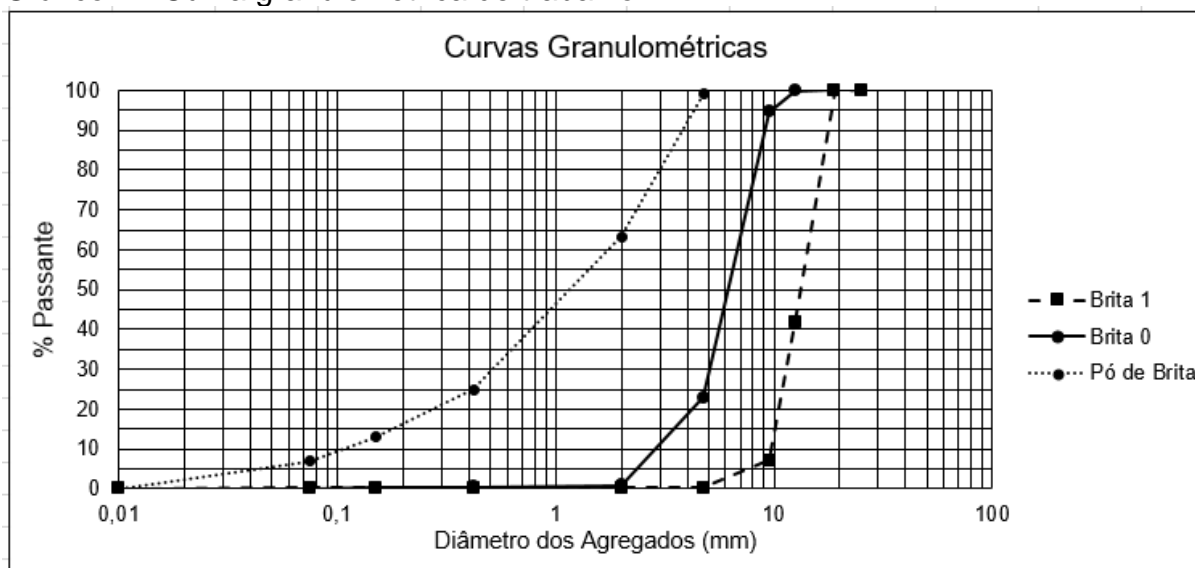
O ensaio granulométrico do material foi realizado conforme a norma DNER-ME 083/98 de Análises Granulométricas, utilizando-se peneiras de malha quadrada e de aberturas regulamentadas conforme as especificações técnicas. A Tabela 4 apresenta os valores das porcentagens passantes dos agregados ensaiados (brita 0, brita 1 e pó de brita) e o Gráfico 1 a curva de trabalho dos agregados.

Tabela 4 - Composição dos agregados

Peneiras		% Passante			
Malha (mm)	Nº	Pó de brita normal	Pó de brita com lavagem	Brita 0	Brita 1
25	1"	100,00	100,00	100,00	100,00
19	3/4"	100,00	100,00	100,00	99,79
12,5	1/2"	100,00	100,00	99,83	41,66
9,5	3/8"	100,00	100,00	94,70	7,14
4,75	4	99,04	99,07	22,99	0,20
2	10	63,22	64,50	0,83	0,20
0,42	40	25,03	28,84	0,57	0,20
0,15	100	13,03	19,07	0,36	0,20
0,075	200	6,95	15,34	0,15	0,20
Fundo	-	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 1 - Curva granulométrica de trabalho



Fonte: Elaboração própria

Percebe-se que os agregados ensaiados não foram possíveis serem enquadrados dentro da faixa C do DNIT pela deficiência na quantidade de finos e, assim, foi necessário separá-los em peneiras para que o excesso de algumas frações fosse desprezado e a curva granulométrica criada conforme os limites das curvas de trabalho proposto pelo DNIT.

No ensaio de granulometria com lavagem, foi possível determinar a porcentagem de material pulverulento (passante na peneira #200), a qual ficou determinada em 15%. Determinou-se a porcentagem de finos existente em cada diâmetro de agregados, possibilitando assim, a correção da composição dos materiais que foram utilizados para a dosagem. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Para facilitar o enquadramento dos materiais dentro da faixa granulométrica e devido à deficiência de finos, foram inseridos 1% de cal hidratada CH-II de origem dolomítica. A Figura 14 mostra a composição da mistura e o Gráfico 2, apresenta a curva de trabalho da mistura, a qual está dentro dos limites propostos pela “FAIXA C” do DNIT.

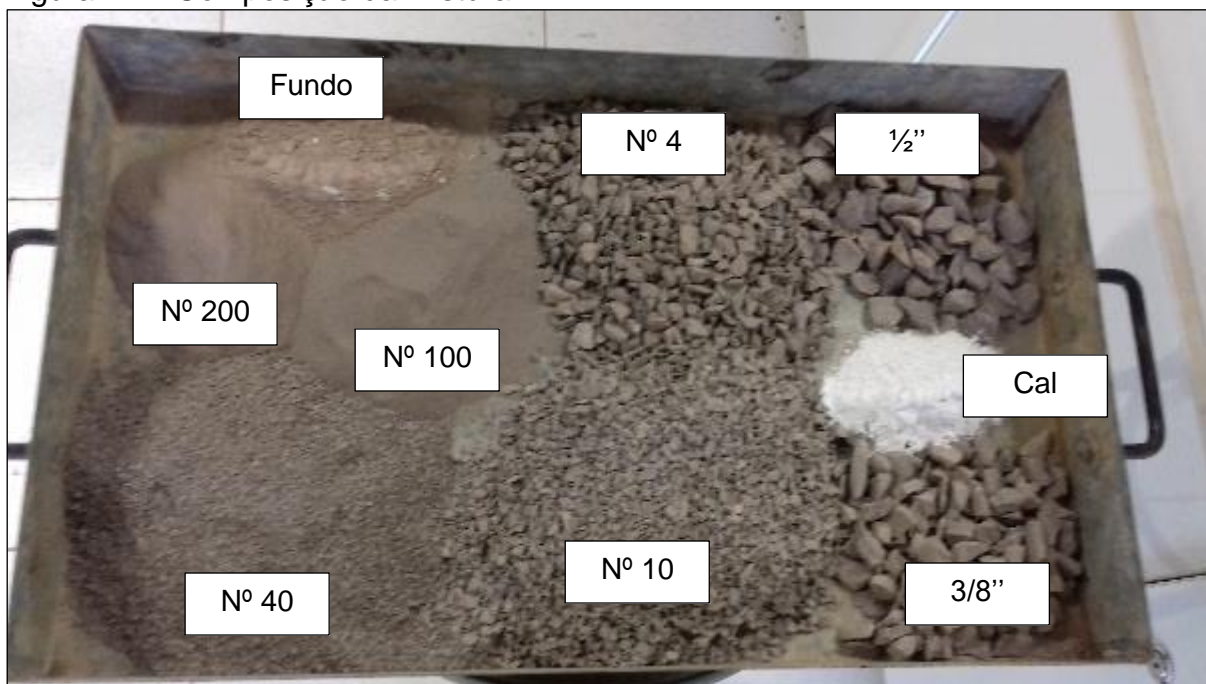


Tabela 5 – Composição da mistura

Peneiras		Materiais		
Malha (mm)	Nº	Quantidade Real (g)	Quantidade Corrigida (g)	%
19,1	3/4"	0,00	0,00	100,00
12,7	1/2"	330,00	330,00	90,00
9,5	3/8"	330,00	330,00	80,00
4,75	4	726,00	726,00	58,00
2	10	725,92	733,38	36,00
0,42	40	626,42	646,07	17,00
0,15	100	229,60	249,02	10,00
0,075	200	126,33	159,37	6,00
fundo	-	172,73	93,17	-
cal	1%	33,00	33,00	-
Total		3300,00	3300,00	-

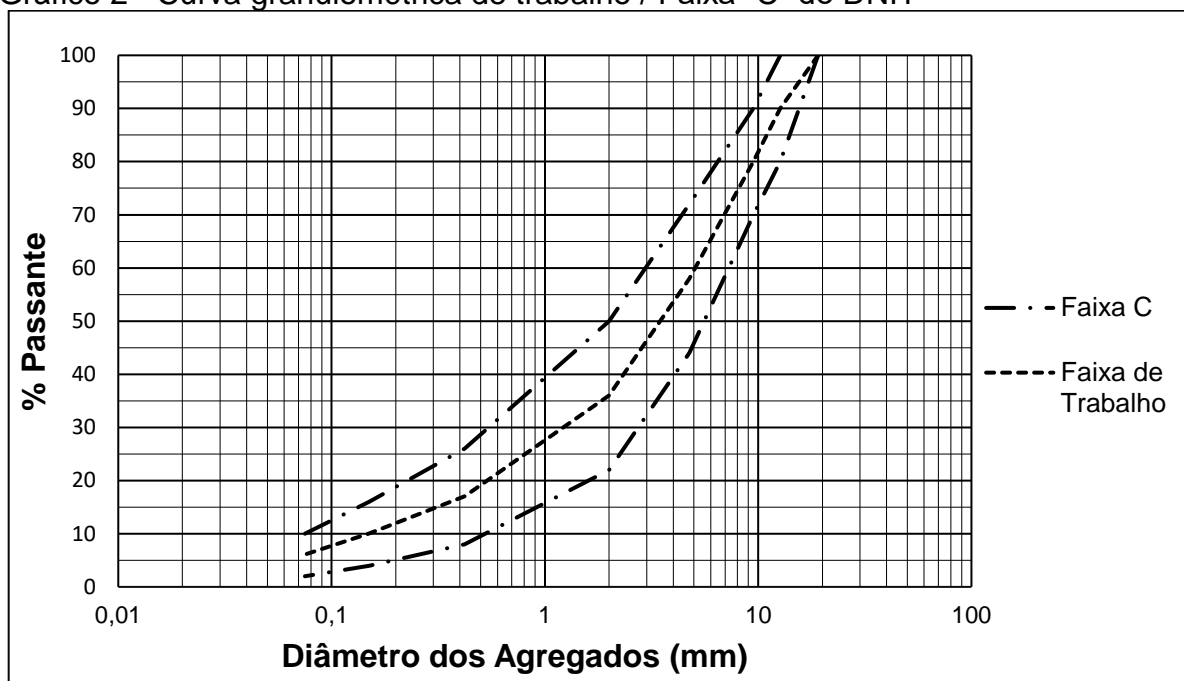
Fonte: Elaboração própria

Figura 14 – Composição da mistura



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 2 - Curva granulométrica de trabalho / Faixa "C" do DNIT



Fonte: Elaboração própria

### 3.1.2 Ligante asfáltico

O ligante a ser utilizado na mistura é o CAP 50/70, produzido na refinaria Alberto Pasqualini em Canoas (RS). Esse tipo de ligante asfáltico é comumente utilizado em obras de pavimentação do Rio Grande do Sul. As propriedades físico-químicas do ligante são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades físico-químicas do CAP 50/70

Propriedade	Unidade	Norma	CAP 50/70	
			Especificação	Resultado
Penetração	0,1mm	NBR 6576	50 a 70	70
Ponto de Amolecimento	°C	NBR 6560	46 min	49
Viscosidade Brookfield 135 °C	cp	NBR 15184	274 min	333
Viscosidade Brookfield 150 °C	cp	NBR 15184	112 min	138
Viscosidade Brookfield 177 °C	cp	NBR 15184	57 a 285 min	68
Ponto de Fulgor	°C	NBR 11341	235 min	334
Densidade Relativa		NBR 6296		1,000

Fonte: Boeira (2016, p. 64)



### 3.1.2.1 Ensaio de Viscosidade

A viscosidade é uma medida da consistência do cimento asfáltico, por resistência ao escoamento. No Brasil, o viscosímetro mais utilizado para os materiais asfálticos é o de Saybolt-furol, seguindo as normativas da DNER-ME 004/94.

Outro modo de se obter a viscosidade é através do método rotacional, que utiliza o equipamento denominado como viscosímetro Brookfield, permitindo medir as propriedades de consistência relacionadas ao bombeamento e a estocagem.

Para a análise do material, o ensaio de viscosidade foi realizado no laboratório da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, utilizando o viscosímetro de Brookfield. Com esse ensaio, determinou-se as temperaturas para mistura e compactação do CAP, como também, um gráfico de temperatura-viscosidade para a mistura asfáltica.

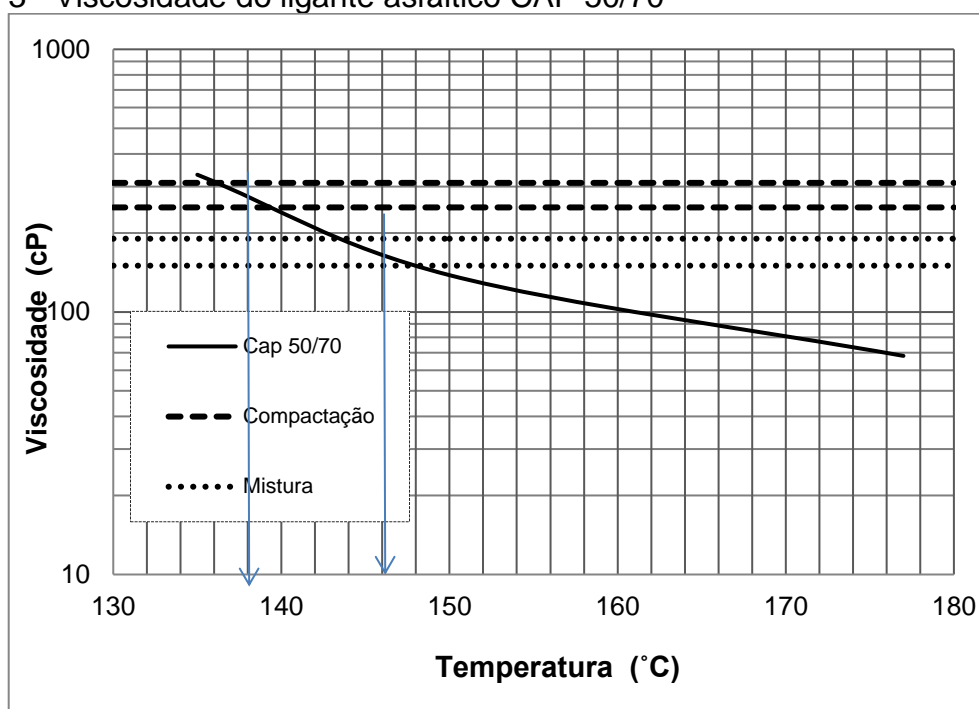
Os resultados obtidos do ensaio são apresentados na Tabela 7 e no Gráfico 3.

Tabela 7 - Ensaio de viscosidade do CAP 50/70

	Viscosidade (cp)			Mistura	Compactação
	333	138	68		
Temperatura (°C)	135	150	177	146°	138°

Fonte: Adaptado de Boeira (2016)

Gráfico 3 - Viscosidade do ligante asfáltico CAP 50/70



Fonte: Elaboração própria

### 3.1.3 Fibras

Para a adição na mistura asfáltica utilizou-se fibras de capimannoni, provenientes da área rural do município de Alegrete - RS. Para fins de estudo foram adotadas fibras com comprimentos de 10 e 20 mm, secas a uma temperatura de 60°C, utilizando a parte superior e inferior do vegetal, conforme a Figura 15.

Figura 15 - Fibra de capimannoni



Fonte: Elaboração própria

As propriedades das fibras de capim annoni como densidade, módulo de elasticidade e tensão de tração serão apresentadas no próximo item.

### **3.1.3.1 Determinação das Propriedades Físicas e Mecânicas do Capim Annoni**

Para a caracterização da fibra de capim annoni foram determinadas propriedades como a tensão de tração, peso específico, umidade e absorção de água.

#### **3.1.3.1.1 Ensaio de Resistência à tração**

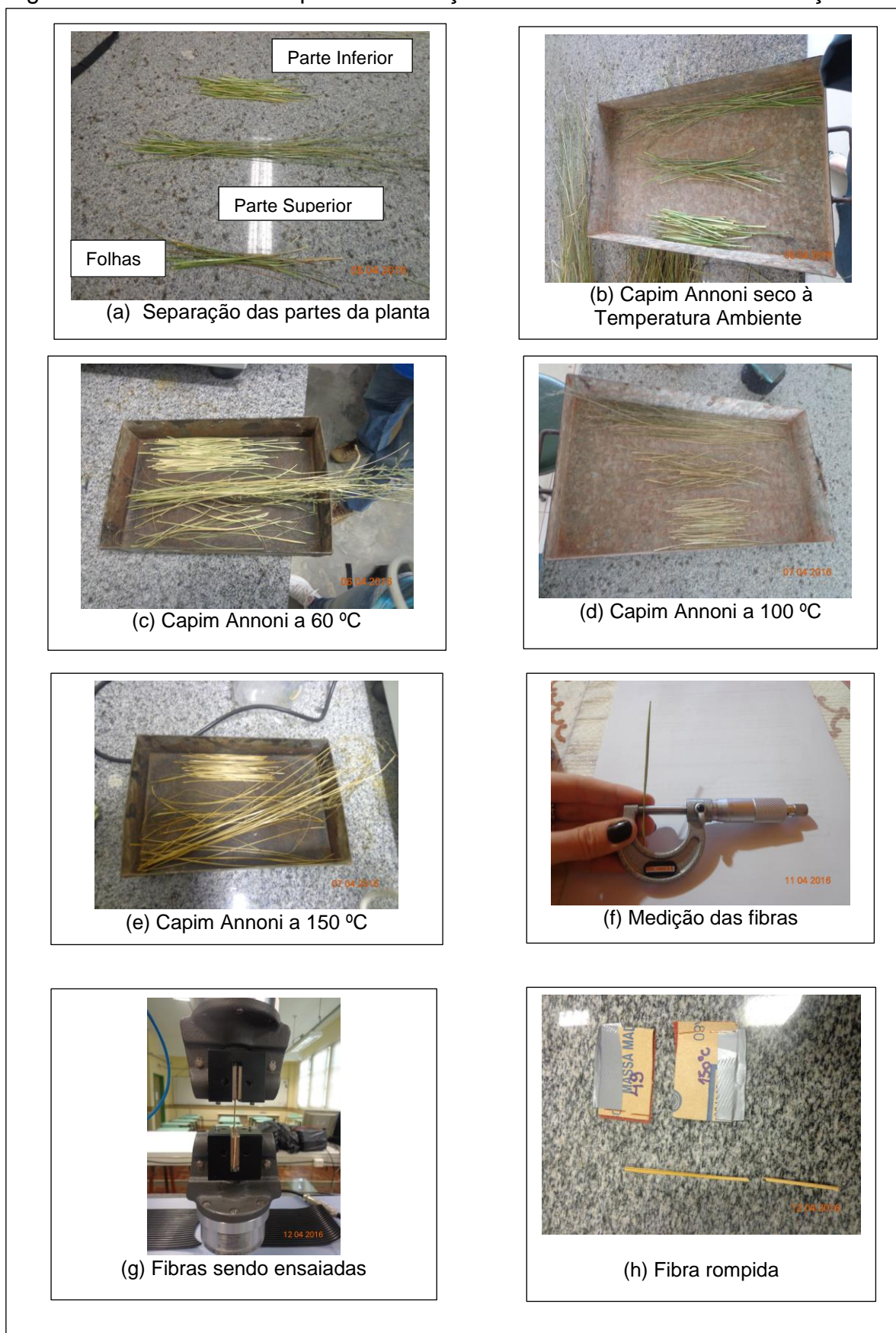
Para a determinação da tensão de tração do capim annoni a planta foi separada em três partes: parte inferior, parte superior e folha para assim analisar o valor de tensão em toda as partes da planta.

Adotou-se um comprimento de fibra de 10 cm e para a realização do ensaio utilizou-se seções retangulares de 10 x 3 cm de lixa de madeira em suas extremidades, evitando assim o escorregamento ou esmagamento da fibra. As dimensões das fibras foram medidas com um micrômetro, considerando a área como uma seção retangular. O Ensaio foi realizado na máquina Shimadzu, utilizando garras pneumáticas, com carga máxima de 5 KN.

Foram ensaiadas fibras em diferentes temperaturas de secagem: TA (Temperatura Ambiente), secagem a 60 °C, 100 °C e a 150 °C, com o propósito de analisar como é o comportamento do vegetal em temperaturas altas. As fibras foram cortadas, considerando as três partes adotadas e colocadas na estufa por 24 horas, conforme a temperatura adotada. Assim foram ensaiadas 5 amostras para cada parte da planta e para cada temperatura, totalizando 60 amostras de fibras.

A Figura 16 apresenta a sequência do procedimento realizado para o ensaio de resistência à tração:

Figura 16 - Procedimentos para a realização do ensaio de resistência à tração



Fonte: Elaboração própria

Com esse ensaio, foram determinadas a tensão de resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra, obtendo-se pelas equações 1, 2 e 3:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \dots(1)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad \dots(2)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \dots(3)$$

Onde:

$\sigma$  = Tensão de tração (Mpa);

F = Força resistente (N);

A = Área da seção (mm<sup>2</sup>);

L = Comprimento Inicial (mm);

$\varepsilon$  = Epsilon (mm/mm);

E = Coeficiente de elasticidade (Mpa);

$\delta$  = Deformação específica (mm).

### 3.1.3.1.2 Peso Específico

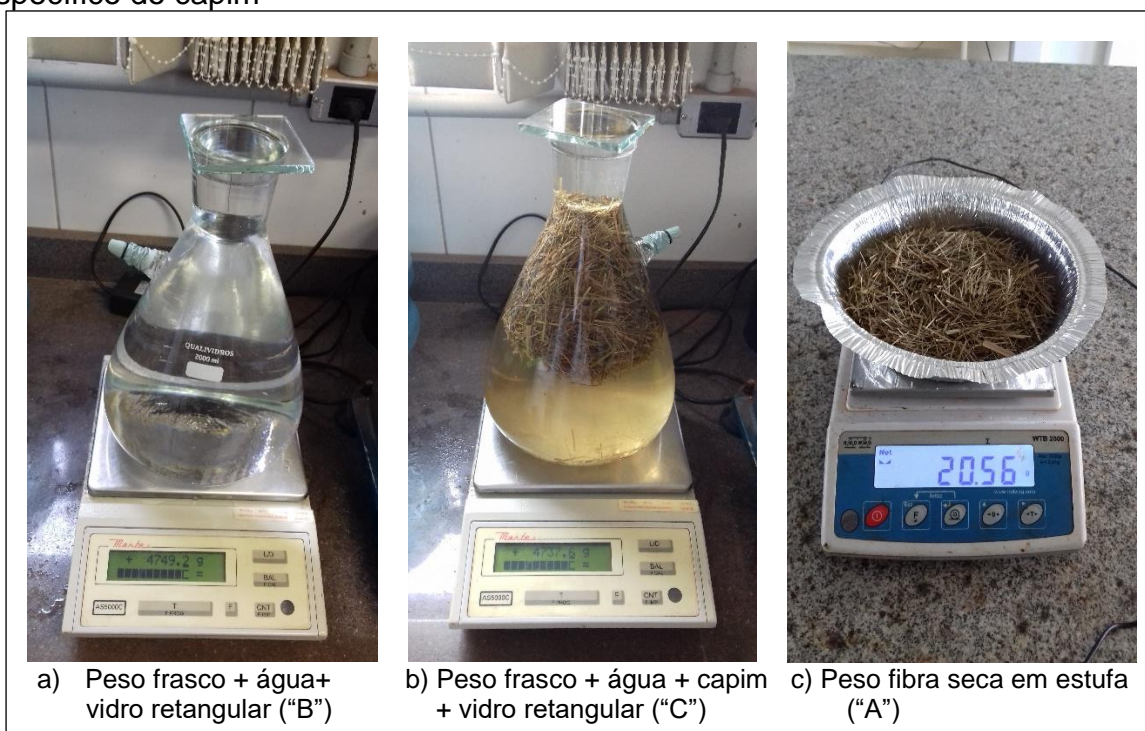
O peso específico das fibras foi determinado conforme a metodologia realizada para a determinação da massa específica máxima (Gmm) das misturas asfálticas, normatizado pelas normas norte-americanas ASTM D 2041 (2000), AASHTO T 209 (1999) e a europeia EM 12697-5.

Primeiramente calibrou-se o frasco kitasato de 2000 ml com água a temperatura de 25 °C, determinando-se “B”. Depois, colocou-se uma quantidade de fibra de capimannoni de 2 cm de comprimento e encheu-se o recipiente de água a uma temperatura de 25 °C, arrasando a superfície com um vidro retangular. O conjunto recipiente, água, fibra e vidro retangular foi pesado, determinando-se “C”.



As fibras foram retiradas, colocadas em uma estufa a 105 °C, por 24 horas, pesadas, determinando “A”. A Figura 17 mostra a seqüência dos procedimentos realizados para determinar o peso específico do capim.

Figura 17- Sequência dos procedimentos realizados para determinar o peso específico do capim



Fonte: Elaboração própria

A estimativa do peso específico é calculado pela equação 4:

$$\gamma = \frac{A}{A+B-C} * 0,9971 \quad \dots(4)$$

Onde:

$\gamma$  = Peso específico (g/cm<sup>3</sup>);

A = massa da amostra seca ao ar (g);

B = massa do recipiente com volume completo de água (g);

C = massa do recipiente mais a amostra submersa em água;

0,9971 = massa específica da água a 25 °C.

A Tabela 8 mostra o resultado obtido para o peso específico da fibra de capim annoni.

Tabela 8 - Peso específico da fibra de capim annoni

<b>(C)</b> Peso Kitasato + capim + água + vidro retangular (g)	4737,6
<b>(B)</b> Peso Kitasato + água + vidro retangular (g)	4749,2
<b>(A)</b> Peso fibra seca (g)	20,56
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	0,64

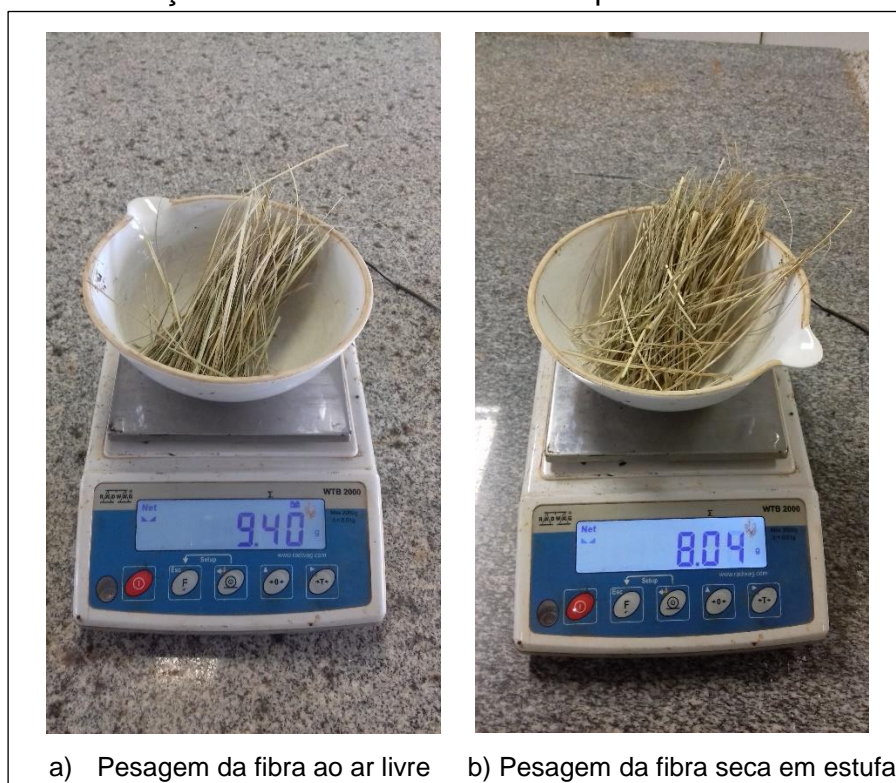
Fonte: Elaboração própria

### 3.1.3.1.3 Umidade

O teor de umidade foi obtido conforme Rosa, Moreira e Bilcati (2012), onde as fibras foram expostas ao ar livre do laboratório por 24 horas e depois, pesadas em balança digital eletrônica com precisão de 0,01 g.

Após ser determinado o peso da fibra ao ar livre, as fibras foram colocadas em estufa a uma temperatura de 110 °C por 24 horas, e novamente pesadas. A Figura 18 ilustra o procedimento realizado para determinar a umidade da fibra.

Figura 18 - Determinação da umidade da fibra de capim annoni



Fonte: Elaboração própria

A umidade natural da fibra foi obtida pela equação 5:

$$H = \frac{\text{Par}-\text{Pest}}{\text{Pest}} \times 100\% \quad \dots(5)$$

Onde:

H = Porcentagem de umidade (%);

Par = Peso da fibra ao ar livre (g);

Pest = Peso da fibra após passar na estufa (g).

Para determinar o valor de umidade considerou-se duas amostras de fibras de capim, realizando o ensaio em dias diferentes. A Tabela 9 mostra os valores encontrados para cada amostra e a média final encontrada de umidade.

Tabela 9 - Umidade da fibra de capimannoni

Umidade (%)		
Amostra 1	Amostra 2	Média
11,11	16,92	14,01

Fonte: elaboração própria

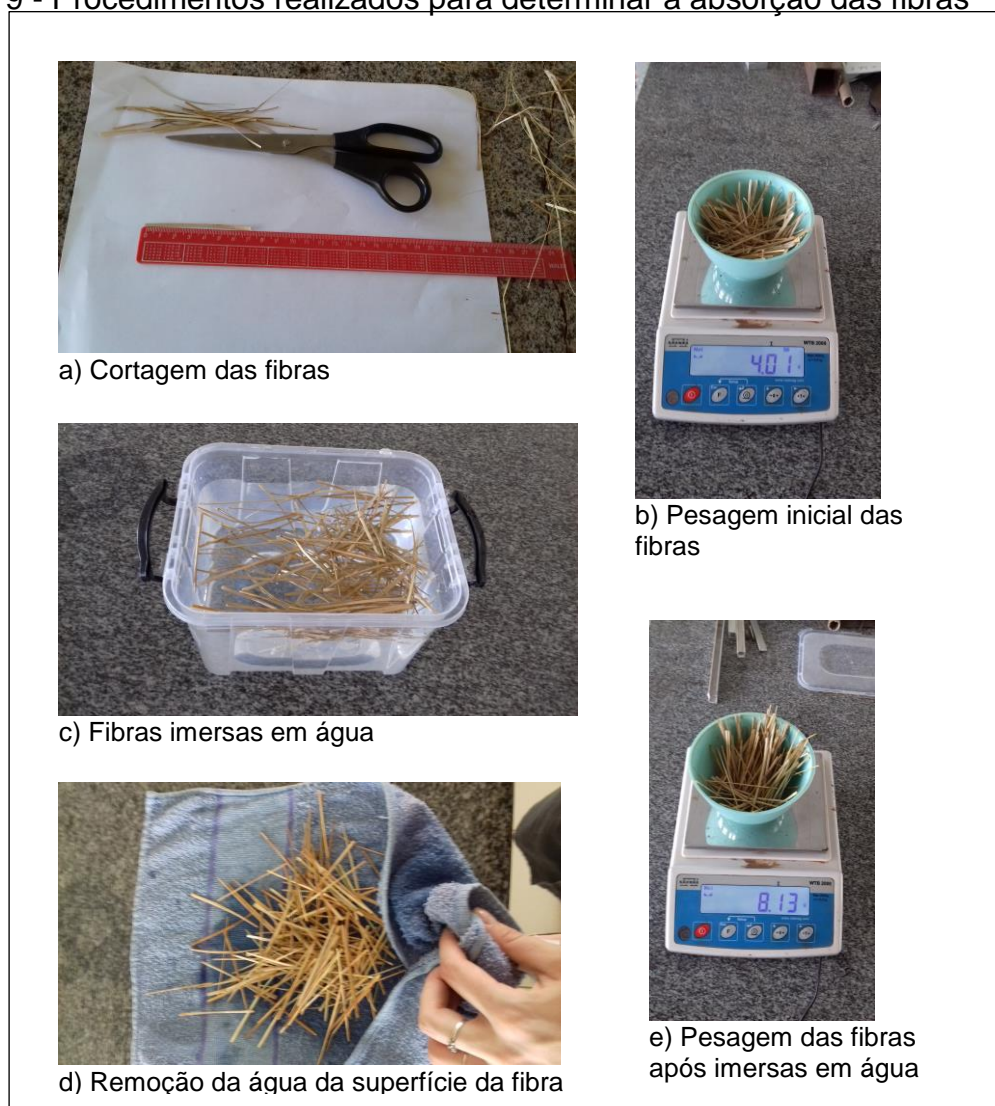
#### 3.1.3.1.4 Absorção de água

A metodologia desenvolvida para o ensaio de absorção segue conforme Toledo Filho (1997). Para o procedimento, as fibras secas ao ar livre foram cortadas em um comprimento de 70 mm, secas em estufas, pesadas em balança digital de 0,01 g e em seguida colocadas em um recipiente com água, de modo que as fibras ficassem totalmente imersas em água.

Em intervalos de tempo de 5 min, 15 min, 30 min, 60 min e depois em 24 horas, as fibras foram retiradas, agitadas para sair o excesso de água e então pesadas novamente. A Figura 19 mostra o procedimento para a determinação da absorção das fibras.



Figura 19 - Procedimentos realizados para determinar a absorção das fibras



Fonte: Elaboração própria

O índice de absorção foi determinado pela equação 6:

$$I_{abs} = \frac{P_{um} - P_{est}}{P_{est}} \times 100\% \quad \dots(6)$$

Onde:

$I_{abs}$  = Índice de absorção d'água (%);

$P_{um}$  = Peso úmido após a absorção d'água (g);

$P_{est}$  = Peso da fibra seca em estufa (g).

Para determinar a absorção da fibra foram consideradas duas amostras de fibras, efetuando-se a médias dos resultados posteriormente. A Tabela 10 apresenta os valores de absorção (%) de cada amostra e a média entre elas.

Tabela 10 - Absorção da fibra de capimannoni

Tempo de imersão	Amostra 1			Amostra 2			Absorção média (%)
	Pest (g)	Pum (g)	Absorção (%)	Pest (g)	Pum (g)	Absorção (%)	
5 min	4	7,63	91	4	7,28	82	86
15 min	4	8,13	103	4	8,36	109	106
30 min	4	8,95	124	4	8,82	121	122
60 min	4	9,78	145	4	9,22	131	138
24 h	4	13,79	245	4	10,94	174	209

Fonte: Elaboração própria

## 3.2 Ensaios com as misturas asfálticas

Para avaliar a adição da fibra de Capim Annoni nas misturas asfálticas para pavimento flexível é necessário definir as misturas e a dosagem, determinar a massa específica aparente e a máxima, o teor de ligante x volume de vazios. Os ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência, também foram realizados.

### 3.2.1 Misturas Asfálticas

Por se tratar de um assunto novo em que não há estudos com um comprimento e porcentagem ideal para misturas asfálticas em pavimentos flexíveis, foram adotadas as seguintes adições para análise:

- Adição de 0,5% de fibra de 10 mm de comprimento;
- Adição de 0,5% de fibra de 20 mm de comprimento;
- Adição de 1% de fibra de 10 mm de comprimento;
- Adição de 1% de fibra de 20 mm de comprimento.
- Mistura Convencional.

De acordo com Vale (2007), são comumente utilizadas na Europa e na América do Norte as fibras minerais ou celulares, em uma porcentagem de 0,3% do peso total da mistura asfáltica no caso europeu e 0,3 a 0,4% no norte-americano.

### **3.2.2 Dosagem Marshall**

A dosagem de uma mistura conforme Bernucci et al. (2008) consiste na escolha de um teor ótimo de ligante a partir de uma faixa granulométrica predefinida.

O método Marshall é o procedimento mais utilizado no Brasil, em que utiliza a compactação por impacto, normatizado pela norma DNER-ME 043/95. A norma apresenta os procedimentos para a determinação da estabilidade e fluência de misturas betuminosas de cimento asfáltico ou alcatrão, a quente, para uso em pavimentação, recomendando um esforço de compactação de 75 golpes por face do corpo de prova.

O método consiste em moldar três corpos de prova para cada teor, neste caso, foram moldados para as adições de 0,5 e 1% considerando comprimentos de 10 e 20 mm, conforme o item 3.2.1.

Primeiramente os agregados foram pesados, adicionando depois o ligante, as fibras e efetuando a homogeneização da mistura. A inserção das fibras na mistura foi feita por adição e não por substituição de material. Depois de 2 horas na estufa à temperatura de compactação (138°), o material foi colocado em um cilindro de 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, em seguida, compactados e armazenados ao ar livre por 24 horas, para depois serem desmoldados.

Depois de serem desmoldados, para obter os padrões de dosagem, os corpos de prova foram medidos e pesados. As Figuras 20 e 21 mostram a sequência de moldagem e compactação utilizada para as cinco misturas definidas na pesquisa.

Figura 20 - Sequência de moldagem das misturas



a) Composição da mistura

b) Pesagem das fibras

c) Adição de ligante aos agregados



d) Adição da fibra ao ligante + agregados



e) Mistura e homogeneização da mistura

Fonte: Elaboração própria



Figura 21 - Sequência final de compactação e desmoldagem



a) Pesagem do material para um molde



b) Colocação do material no cilindro



c) Compactação – processo mecânico



d) Desmoldagem dos corpos de prova

Fonte: Elaboração própria

### 3.2.2.1 Massa Específica Aparente (Gmb)

A massa específica aparente, conforme Bernucci et al. (2008), é obtida a partir de corpos de prova de uma mistura asfáltica compactada, dada pela Equação 7:

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_{sss} - M_{sss\ sub}} * 0,9971 \quad \dots(7)$$

Onde:

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

$M_{sss}$  = massa do corpo de prova na condição de superfície saturada seca (g);

$M_{sss\ sub}$  = massa do corpo de prova submerso em água (g);

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

O ensaio é normatizado pelo DNIT 117/2010, na qual determina-se a massa específica da mistura asfáltica em corpos de prova moldados em laboratório ou obtidos em pista. Segundo esse método, obtém-se a massa específica aparente pela relação entre a massa seca do corpo de prova e a diferença da massa seca e a massa seca do corpo de prova posteriormente submerso em água.

Para o procedimento do ensaio, os corpos de prova foram pesados, obtendo-se a massa seca ( $M_s$ ), depois, foram pesados imersos em água com uma temperatura de 25 °C, obtendo-se a massa seca submersa ( $M_{sss\ sub}$ ). Feito isso, os corpos de prova foram retirados da água, eliminando-se a água da superfície com uma toalha, pesando novamente e obtendo assim, a massa saturada ( $M_{sss}$ ).

A Figura 22 ilustra o procedimento realizado para determinar a massa específica aparente.

Figura 22 - Procedimento do ensaio de massa específica aparente



a) Peso seco

b) Ajuste da temperatura 25 °C

c) Peso submerso



d) Remoção da água da superfície do CP



e) Peso saturado seco

Fonte: Elaboração própria

As Tabelas 11, 12, e 13 representam os resultados obtidos para a massa específica aparente (Gmb). Os resultados foram obtidos a partir da Equação 7, onde que cada valor da massa específica corresponde à média dos três corpos de prova ensaiados para cada teor de ligante.

Tabela 11 - Massa específica aparente (Gmb) da mistura convencional

<b>Mistura Convencional</b>	
<b>Teor de ligante (%)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
5,5	2,328
6	2,337
6,5	2,351
7	2,363
7,5	2,386

Fonte: Elaboração própria

Tabela 12 - Massa específica aparente (Gmb) da mistura de 1 cm

<b>Teor de ligante (%)</b>	<b>Adição 0,5% 1 cm</b>	<b>Adição 1% 1 cm</b>
	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
5,5	2,242	2,148
6	2,209	2,157
6,5	2,253	2,170
7	2,252	2,172
7,5	2,292	2,176

Fonte: Elaboração própria

Tabela 13 - Massa específica aparente (Gmb) da mistura de 2 cm

<b>Teor de ligante (%)</b>	<b>Adição 0,5% 2 cm</b>	<b>Adição 1% 2 cm</b>
	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
5,5	2,242	2,084
6	2,250	2,096
6,5	2,257	2,104
7	2,274	2,133
7,5	2,288	2,159

Fonte: elaboração própria



### 3.2.2.2 Massa Específica Máxima (Gmm)

A massa específica máxima teórica ou densidade máxima teórica é dada pela ponderação entre as massas obtidas dos materiais que constituem as misturas asfálticas (BERNUCCI et al., 2008).

No Brasil ainda não há um método normatizado para determinar este parâmetro, na qual pode ser obtido seguindo as norte-americanas ASTM D 2041 (2000), AASHTO T 209 (1999) ou o europeu EM 12697-5, sendo o primeiro método adotado para este ensaio.

Para a realização do ensaio, utilizou-se um kitasato de 2000 ml, onde primeiramente encheu-se de água a temperatura de 25 °C, arrasando a superfície com um vidro retangular, e efetuando a pesagem, determinando-se assim “B”.

Depois, foi pesado aproximadamente 1500 g da mistura (“A”), colocado dentro do kitasato e preenchido com água a temperatura de 25 °C até que toda a mistura ficou coberta. Feito isso, aplicou-se uma pressão a vácuo residual no recipiente de 30 mmHg por um período de 15 minutos, expulsando o ar existente entre os agregados encobertos pelo filme de ligante.

Após o período submetido ao vácuo, a pressão ambiente foi restabelecida e assim, completou-se com água o frasco, utilizando um vidro retangular para arrasar a superfície do kitasato. O conjunto frasco e vidro retangular, mistura asfáltica e água foi pesado, determinando-se “C”. O Gmm foi obtido então pela Equação 8:

$$Gmm = \frac{A}{A+B-C} * 0,9971 \quad \dots(8)$$

Onde:

A = massa da amostra seca em ar (g);

B = massa do recipiente com volume completo de água (g);

C = massa do recipiente mais a amostra submersa em água (g).

A Figura 23 mostra a sequência realizada para determinar a massa específica máxima.

Figura 23 - Sequência para a determinação da massa específica máxima



a) Pesagem da mistura

b) Pesagem do frasco +  
Água + vidro retangularc) Ajuste da temperatura  
a 25 °Cd) Retirada das bolhas de ar  
com o vácuoe) Amostra da mistura sem bolhas  
+ água + vidro retangular

Fonte: Elaboração própria

As Tabelas 14, 15 e 16 constam os valores obtidos para máxima específica máxima. Os resultados foram obtidos pela Equação 8, sendo que cada um dos valores corresponde à média de dois ensaios realizados.

Tabela 14 – Massa específica máxima da mistura convencional

<b>Mistura Convencional</b>	
<b>Teor de ligante (%)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
5,5	2,499
6	2,478
6,5	2,464
7	2,450
7,5	2,446

Fonte: Elaboração própria

Tabela 15 – Massa específica máxima da mistura de 1 cm

<b>Teor de ligante (%)</b>	<b>Adição 0,5% 1 cm</b>	<b>Adição 1% 1 cm</b>
	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
5,5	2,490	2,469
6	2,469	2,455
6,5	2,429	2,446
7	2,416	2,410
7,5	2,438	2,420

Fonte: Elaboração própria

Tabela 16 – Massa específica máxima da mistura de 2 cm

<b>Teor de ligante (%)</b>	<b>Adição 0,5% 2 cm</b>	<b>Adição 1% 2 cm</b>
	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
5,5	2,481	2,475
6	2,473	2,454
6,5	2,449	2,459
7	2,436	2,437
7,5	2,431	2,435

Fonte: Elaboração própria

### 3.2.2.3 Volume de Vazios X Teor de Ligante Ótimo

A dosagem Marshall apresenta diversas alternativas para definir o teor de ligante asfáltico. Para esta pesquisa estará relacionado apenas ao volume de vazios ( $V_v$ ) correspondente a 4% para camadas de rolamento (BERNUCCI et al., 2008).

A Equação 9 é utilizada para determinar este parâmetro:

$$V_v = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad \dots(9)$$

Onde:

$V_v$  = volume de vazios (%);

$G_{mm}$  = massa específica máxima (g);

$G_{mb}$  = massa específica aparente (g)

Para a determinação do teor ótimo de ligante asfáltico foram preparadas quinze amostras com diferentes teores de asfaltos. Para cada teor foram moldados três corpos de provas para a avaliação das propriedades mecânicas e volumétricas e também preparadas amostras para a obtenção da massa específica máxima. Para esta pesquisa, o volume de vazios foi definido como correspondente a 4% para camadas de rolamento. Porém, o comportamento das misturas asfálticas com fibra de capim annoni resultou em valores superiores aos 4% estipulados, sendo analisados no Capítulo 4.

### 3.2.3 Quantitativo dos corpos de prova necessários

Para a realização da dosagem Marshall e dos ensaios mecânicos segue na Tabela 17, o quantitativo dos corpos de prova, sendo especificados a quantidade por porcentagem e comprimento de fibra utilizado na mistura. No desenvolver da pesquisa, percebeu-se que não seria possível determinar o teor ótimo de ligante pelo critério dos 4% de volume de vazios, e assim, foi realizado o ensaio de MR e RT com todos os corpos de prova moldados.

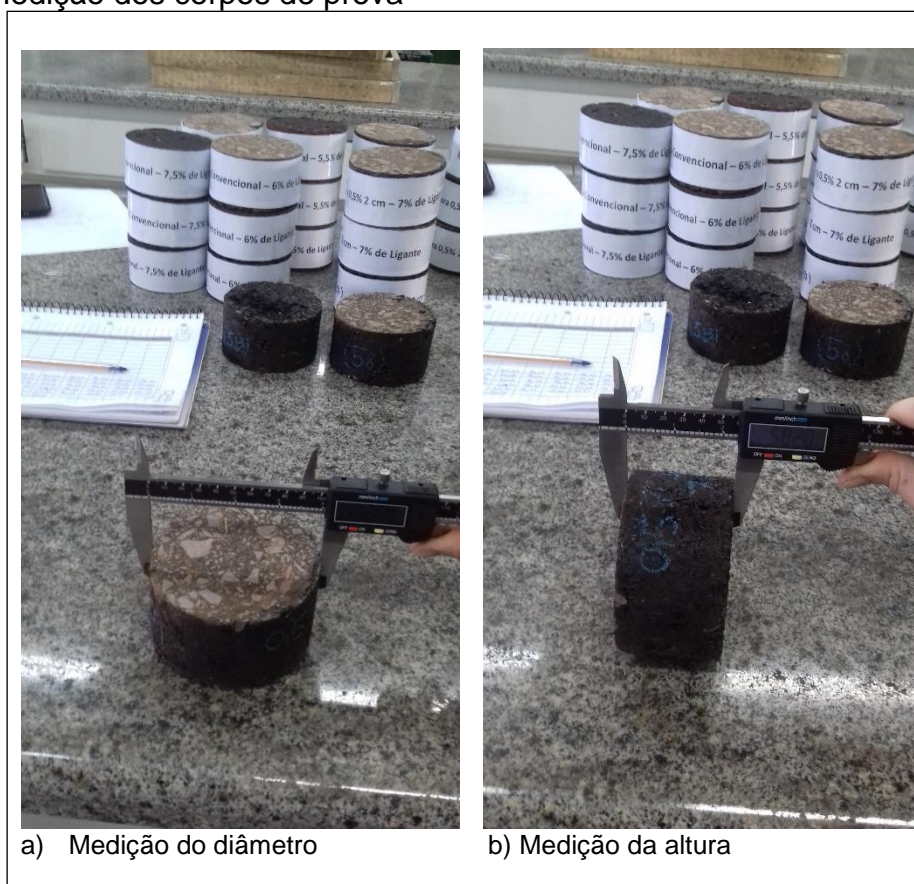
Tabela 17 - Quantitativo dos corpos de prova

Ensaio	Quantidade				
	0,5% (10 mm)	0,5% (20 mm)	1% (10 mm)	1% (20 mm)	Mistura Convencional
Dosagem Marshall	3 x 5	3 x 5	3 x 5	3 x 5	3 x 5
Módulo de Resiliência e Resistência à tração	-	-	-	-	-
<b>Total</b>	75 corpos de prova				

Fonte: Elaboração própria

Depois de moldados, para a realização dos ensaios, foram medidos a altura dos corpos de prova com um paquímetro em quatro posições equidistantes, e para o diâmetro foram medidas três posições paralelas, adotando como altura e diâmetro a média entre os valores obtidos, conforme mostra a Figura 24. Também, como pode ser observado nas figuras, os corpos de provas foram retificados em uma das faces, visando a análises futuras quanto a obtenção de deformações por meio de imagens.

Figura 24 - Medição dos corpos de prova



a) Medição do diâmetro

b) Medição da altura

Fonte: Elaboração própria

### **3.2.4 Ensaios Mecânicos**

Os ensaios de laboratório são utilizados com o intuito de proporcionar maior entendimento do comportamento mecânico dos materiais em campo, uma vez que os ensaios “in situ”, ou trechos experimentais, são, na maioria das vezes, de difícil execução. Assim, os ensaios devem reproduzir o máximo possível a situação de campo, ou seja, tempo de carregamento, níveis de tensão, grau de compactação, entre outros.

Neste trabalho, foram realizados ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral que são descritos logo abaixo, onde os resultados obtidos são comparados a critérios de dimensionamento pré-estabelecidos.

#### **3.2.4.1 Ensaio Módulo de Resiliência**

O módulo de resiliência é definido pela relação entre a tensão de tração aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura asfáltica e a deformação específica recuperável, correspondente à tensão aplicada. No Brasil, esse ensaio é normatizado pelo DNIT 135/2010 – ME que estabelece os procedimentos metodológicos para determinar o módulo de resiliência de misturas asfálticas e prescreve a aparelhagem usada e condições para obtenção do resultado.

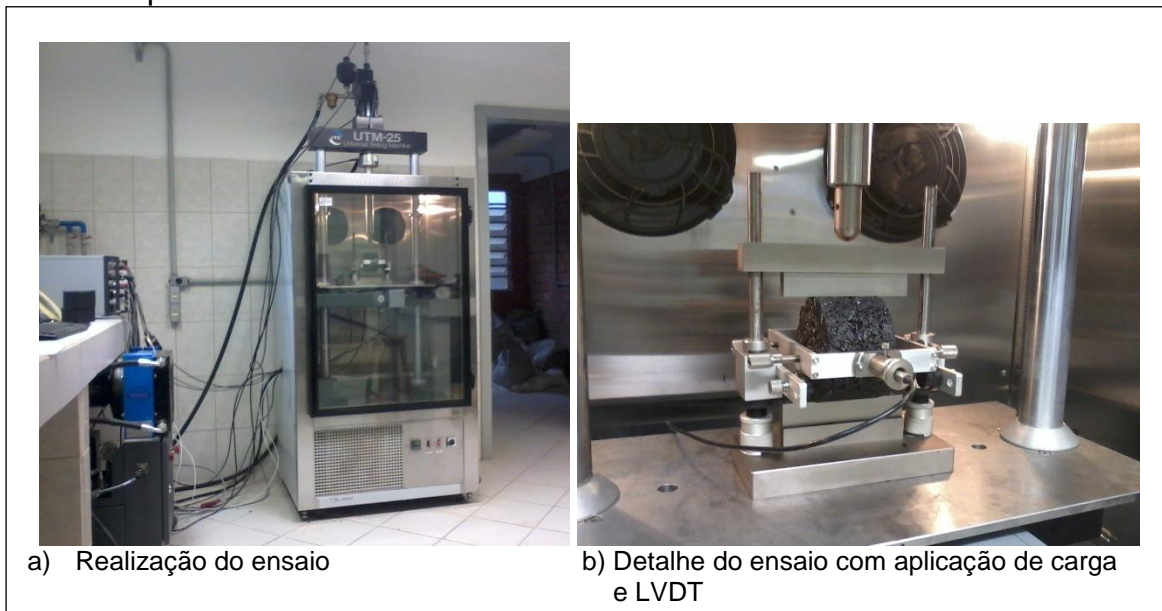
Para a realização do ensaio, os corpos de prova foram moldados com o compactador Marshall com aproximadamente 100 mm de diâmetro e 63,5mm de altura e ensaiados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, onde foram primeiramente condicionados em câmara climática por 24 horas a 25 °C.

Os mesmos foram posicionados no interior do suporte da prensa em sua superfície cilíndrica, onde o pistão de carga foi assentado com o friso superior em contato com o corpo de prova e os transdutores LVDT (Linear Variable Differential Transducer) fixados e ajustados, de modo a obter o registro no microcomputador no início da escala linear dos mesmos.

Após realizar os ajustes dos LVDT'S, iniciou-se o ensaio com 15 pulsos de uma força de 700 N para deformar o corpo de prova sem causar danos irreversíveis. A

carga foi aplicada com tempos de 0,1 e 0,9 s de repouso. O ensaio foi realizado com o corpo de prova rotacionado a 0° e 90°. A Figura 25 ilustra a sequência do ensaio.

Figura 25 - Sequência de ensaio do módulo de resiliência



Fonte: Elaboração própria

Com os valores obtidos, foram calculados os módulos de resiliência, através da equação 10:

$$Mr = \frac{P}{\Delta \cdot h} * (0,2692 + 0,9976 * \mu) \quad \dots(10)$$

Onde:

Mr = módulo de resiliência (Mpa);

P = carga vertical repetida aplicada diretamente no corpo de prova (N);

$\Delta$  = deslocamento elástico ou resiliente (mm);

h = altura do corpo de prova (mm);

$\mu$  = coeficiente de Poisson (0,30).

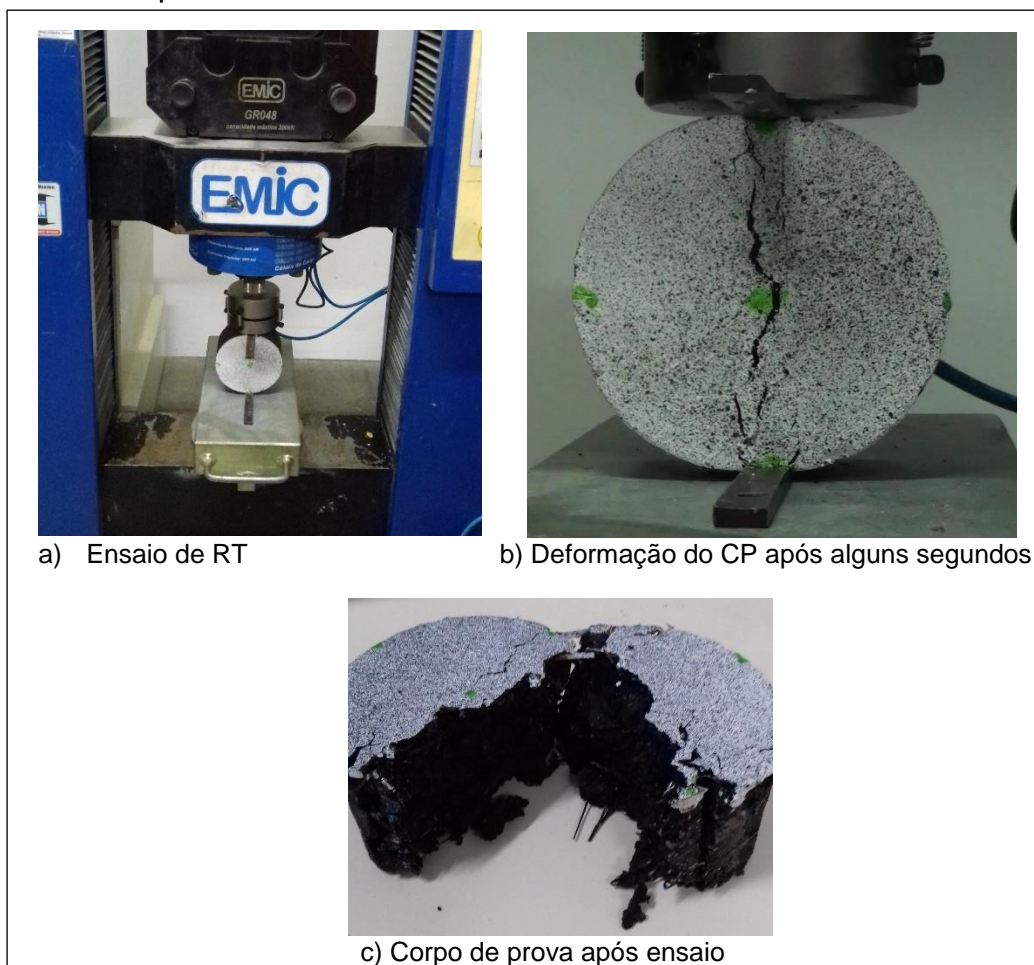


### 3.2.4.2 Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral é normatizado pelo DNIT 136/2010 – ME, que consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro, onde geram ao longo do diâmetro solicitado tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro (BERNUCCI et al., 2008).

Para a realização do ensaio os corpos de prova foram moldados conforme as dimensões descritas no item anterior 3.2.2. Os mesmos foram condicionados em uma estufa em temperatura de 25 °C por no mínimo 2 horas e após foram posicionados sob dois frisos metálicos de 12,7 mm para que a carga fosse aplicada até a ruptura. Utilizou-se para o ensaio uma velocidade de 0,8 mm/s. A sequência do ensaio segue na Figura 26.

Figura 26 - Sequência de ensaio de RT



Fonte: Elaboração própria



Com o valor da carga de ruptura foi possível definir a tensão de tração no corpo de prova, conforme a Equação 11:

$$RT = \frac{2F}{\pi DH} \quad \dots(11)$$

Onde:

RT = resistência à tração (kgf/cm<sup>2</sup>);

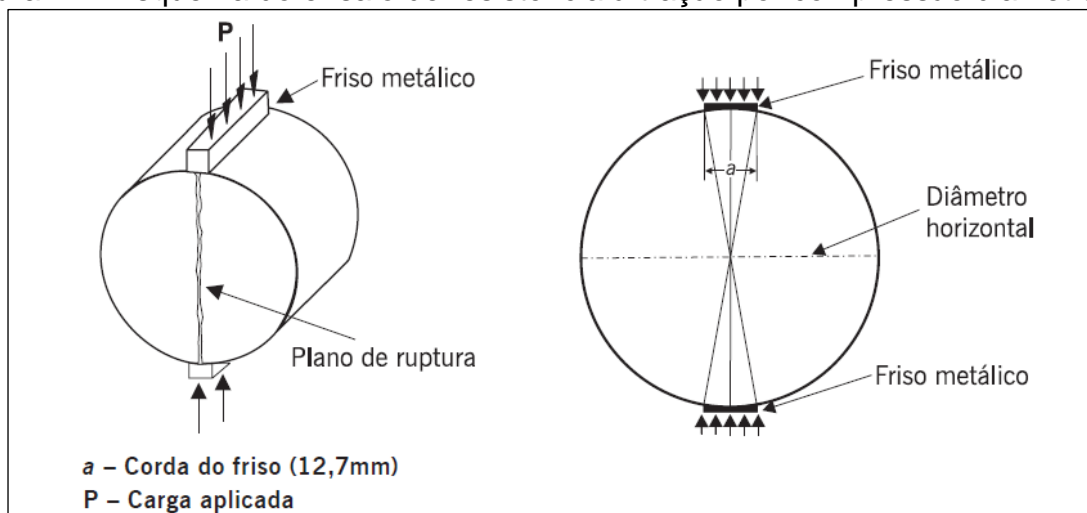
F = carga de ruptura (kgf);

D = diâmetro do corpo de prova (cm);

H = altura do corpo de prova (cm).

A Figura 27 abaixo indica o método de realização do ensaio e o plano de ruptura:

Figura 27 - Esquema do ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Bernucci et al. (2008, p. 309)

## **4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Neste capítulo são apresentados os resultados do ensaio de resistência à tração da fibra de capimannoni e os resultados das análises volumétricas das misturas e dos ensaios mecânicos de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral dos 75 corpos de prova, moldados para a realização do presente estudo de avaliar a influência da adição de fibras de capimannoni nas misturas asfálticas.

### **4.1 Ensaio de resistência à tração da fibra de capimannoni**

As Tabelas 18, 19, 20 e 21 apresentam os resultados obtidos para a resistência à tração e módulo de elasticidade para a fibra de capim, considerando o ensaio realizado para as quatro temperaturas de secagem da planta: temperatura ambiente, 60 °C, 100 °C e 150 °C e também para as três partes das plantas consideradas: inferior, superior e folhas.

Os valores de tensão e módulo de elasticidade (E) da fibra foram obtidos conforme as equações 1, 2 e 3, sendo que cada valor representa a média de cinco ensaios correspondentes a cinco amostras de cada parte da planta.

Tabela 18 - Resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra a T.A.

Parte	Amostra	Tensão (MPa)	Tensão (MPa)	E (Gpa)	E (Gpa)
Inferior	1	121,29	98,28	8,52	8,98
	2	73,39		6,85	
	3	88,32		9,21	
	4	98,67		8,65	
	5	109,72		11,65	
Superior	6	46,41	61,77	17,42	15,93
	7	49,74		15,05	
	8	16,81		14,67	
	9	104,47		16,9	
	10	87,39		15,6	
Folhas	11	31,96	46,7	2,09	3,57
	12	48,55		5,62	
	13	53,78		2,64	
	14	X		X	
	15	52,51		3,91	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 19 - Resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra a 60 °C

Parte	Amostra	Tensão (MPa)	Tensão (MPa)	E (Gpa)	E (Gpa)
Inferior	16	72,14	99,38	13,25	12,88
	17	82,67		14,85	
	18	115,66		11,04	
	19	90,29		13,65	
	20	136,13		11,62	
Superior	21	145,19	124,04	17,73	20,07
	22	127,49		17,79	
	23	109,38		25,69	
	24	145,56		18,80	
	25	92,56		20,36	
Folhas	26	56,51	53,13	5,08	4,91
	27	41,32		3,32	
	28	45,00		3,87	
	29	56,34		3,87	
	30	66,47		8,40	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 20 - Resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra a 100 °C

Parte	Amostra	Tensão (MPa)	Tensão (MPa)	E (Gpa)	E (Gpa)
Inferior	31	32,47	77,30	2,21	11,69
	32	90,02		14,99	
	33	94,58		9,25	
	34	128,04		19,69	
	35	41,37		12,29	
Superior	36	101,08	95,39	18,02	19,53
	37	157,10		23,42	
	38	87,29		19,52	
	39	65,82		19,54	
	40	65,66		17,17	
Folhas	41	37,36	47,44	5,53	6,60
	42	71,31		9,08	
	43	61,81		5,78	
	44	39,77		8,02	
	45	26,94		4,60	

Fonte: Elaboração própria

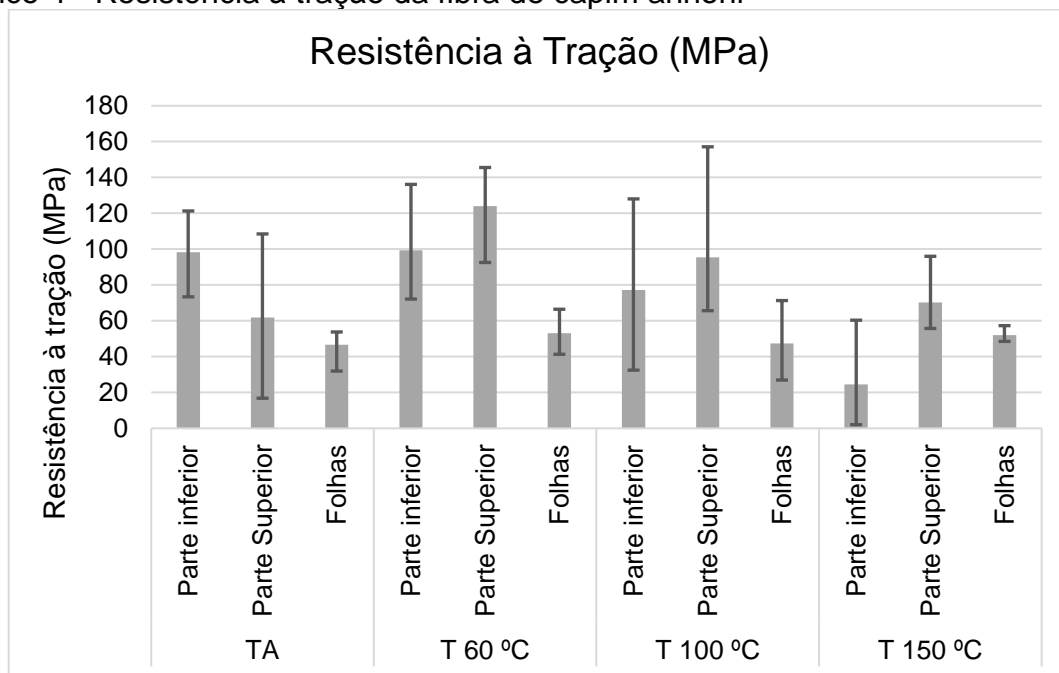
Tabela 21 - Resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra a 150 °C

Parte	Amostra	Tensão (MPa)	Tensão (MPa)	E (Gpa)	E (Gpa)
Inferior	46	60,37	24,56	13,57	11,14
	47	2,06		4,34	
	48	25,03		13,86	
	49	22,88		15,32	
	50	12,47		8,63	
Superior	51	27,74	70,17	14,85	24,07
	52	33,95		20,18	
	53	68,02		21,22	
	54	X		X	
	55	39,00		11,53	
Folhas	56	48,52	52,02	8,28	7,31
	57	52,46		6,33	
	58	50,00		7,01	
	59	51,79		5,49	
	60	57,31		9,42	

Fonte: Elaboração própria

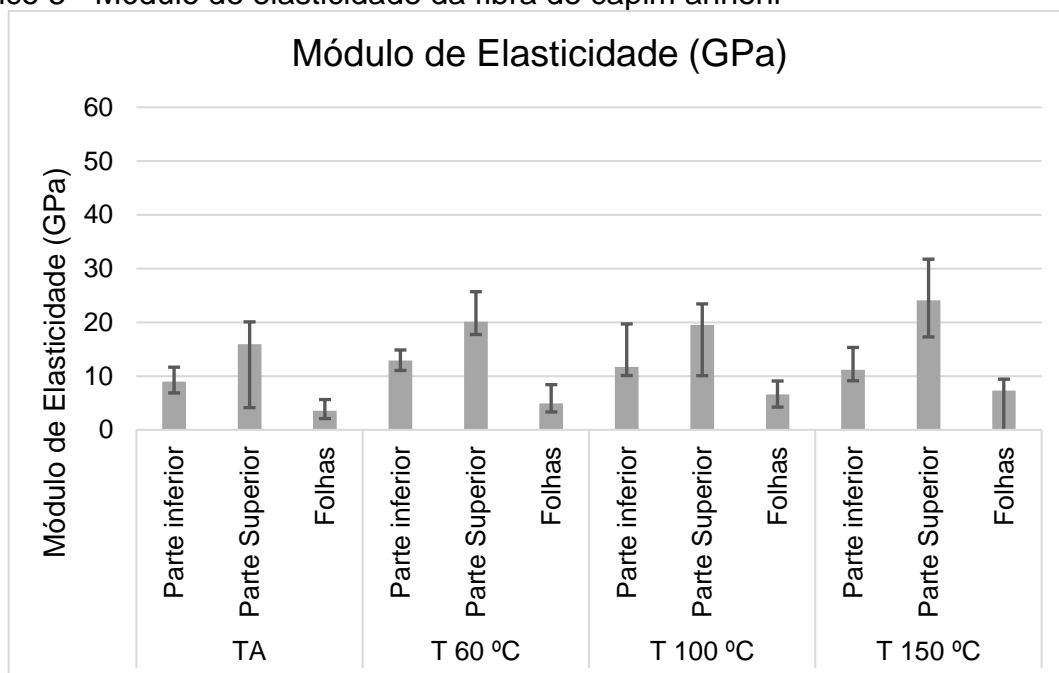
Os Gráficos 4 e 5 sintetizam os dados apresentados nas Tabelas 18, 19, 20, 21. Os gráficos referem-se aos dados da tensão de tração e módulo de elasticidade para cada parte do capim ensaiado a diferentes temperaturas de secagem.

Gráfico 4 - Resistência à tração da fibra de capimannoni



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 5 - Módulo de elasticidade da fibra de capimannoni



Fonte: Elaboração própria

Adicionou-se uma barra de erros, onde o valor positivo corresponde a variação entre o maior valor de resistência e módulo de elasticidade e a média, e o valor negativo a variação entre a média e o menor valor de resistência e módulo de elasticidade.

Conforme os dados apresentados, percebe-se que a tensão de tração diminui aumentando gradativamente a temperatura, e em relação as três partes da planta, a que apresentou menor resistência, em geral, foi as folhas. A temperatura que apresentou o maior valor de tensão foi a de 60 °C, razão pelo qual utilizou-se essa temperatura de preparo da fibra para utilização na mistura asfáltica.

Por se tratarem de fibras vegetais, observa-se uma dispersão de valores entre as amostras ensaiadas.

## 4.2 Caracterização Volumétrica das Misturas

Após os ensaios de massa específica aparente e máxima, foi possível determinar o volume de vazios para cada uma das misturas, através da Equação 9 da seção 3.2.2.3. As Tabelas 22, 23, 24, 25 e 26 apresentam um resumo das massas específicas aparente e máxima e o volume de vazios correspondentes para cada teor de ligante.

Tabela 22 - Volume de vazios para a mistura convencional

<b>Mistura Convencional</b>			
<b>% de Ligante</b>	<b>Gmm (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Gmb (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Vv (%)</b>
5,5	2,499	2,328	6,8
6	2,478	2,337	5,7
6,5	2,464	2,351	4,6
7	2,450	2,363	3,5
7,5	2,446	2,386	2,5

Fonte: Elaboração própria

Tabela 23 - Volume de vazios para a mistura 0,5% 1 cm

<b>Mistura 0,5% 1 cm</b>			
<b>% de Ligante</b>	<b>Gmm (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Gmb (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Vv (%)</b>
5,5	2,490	2,242	10,0
6	2,469	2,209	10,5
6,5	2,429	2,253	7,2
7	2,416	2,252	6,8
7,5	2,438	2,292	6,0

Fonte: Elaboração própria

Tabela 24 - Volume de vazios para a mistura 1% 1 cm

<b>Mistura 1% 1 cm</b>			
<b>% de Ligante</b>	<b>Gmm (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Gmb (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Vv (%)</b>
5,5	2,469	2,148	13,01
6	2,455	2,157	12,14
6,5	2,446	2,17	11,27
7	2,410	2,172	9,89
7,5	2,420	2,176	10,09

Fonte: Elaboração própria

Tabela 25 - Volume de vazios para a mistura 0,5% 2 cm

<b>Mistura 0,5% 2 cm</b>			
<b>% de Ligante</b>	<b>Gmm (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Gmb (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Vv (%)</b>
5,5	2,481	2,242	9,63
6	2,473	2,25	9,03
6,5	2,449	2,257	7,86
7	2,436	2,274	6,66
7,5	2,431	2,288	5,87

Fonte: Elaboração própria

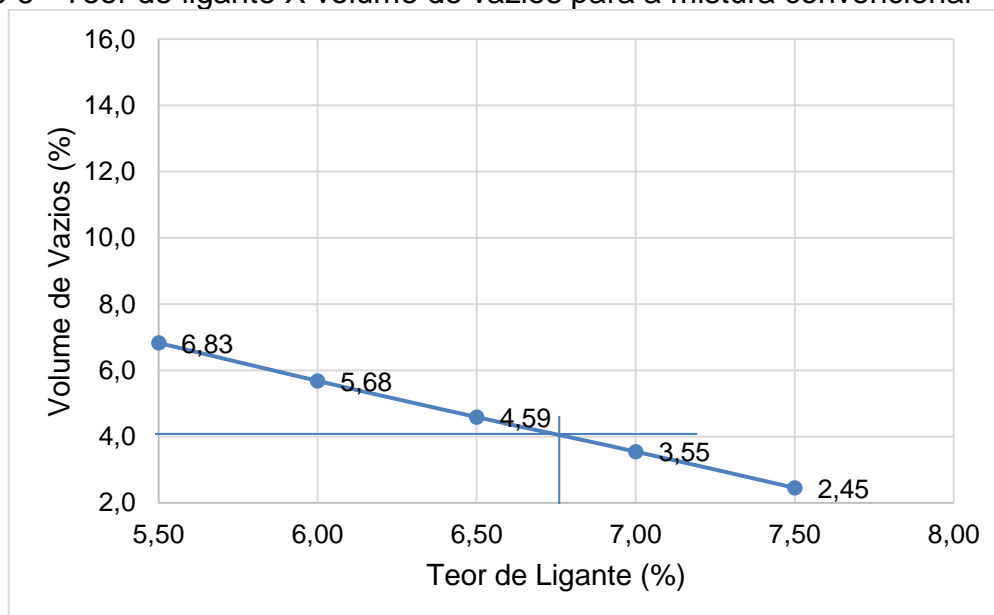
Tabela 26 - Volume de vazios para a mistura 1% 2 cm

Mistura 1% 2 cm			
% de ligante	Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	Vv (%)
5,5	2,475	2,084	15,80
6	2,454	2,096	14,59
6,5	2,459	2,104	14,43
7	2,437	2,133	12,46
7,5	2,435	2,159	11,33

Fonte: Elaboração própria

Os Gráficos 6, 7, 8, 9 e 10 fazem uma relação do volume de vazios com o teor de ligante das misturas, conforme as Tabelas 22, 23, 24, 25 e 26. Essa relação é realizada para determinar o teor de ligante ótimo das misturas.

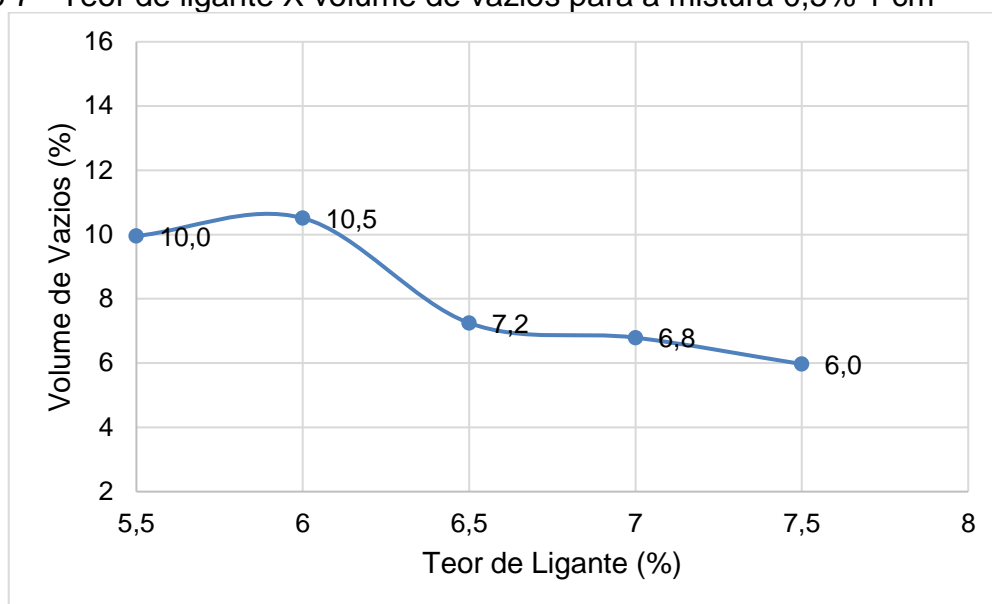
Gráfico 6 - Teor de ligante X volume de vazios para a mistura convencional



Fonte: Elaboração própria

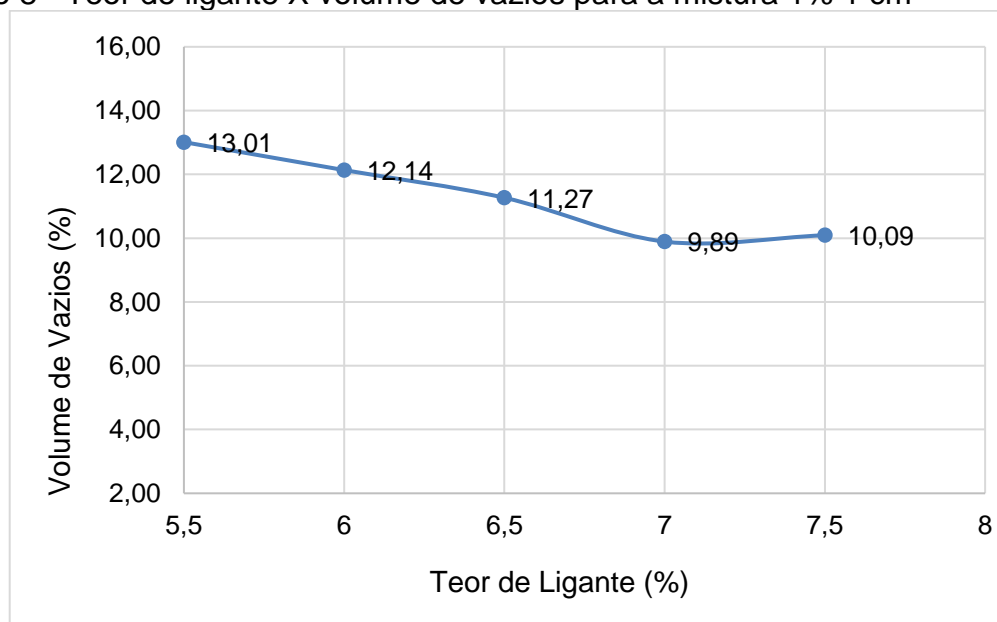


Gráfico 7 - Teor de ligante X volume de vazios para a mistura 0,5% 1 cm



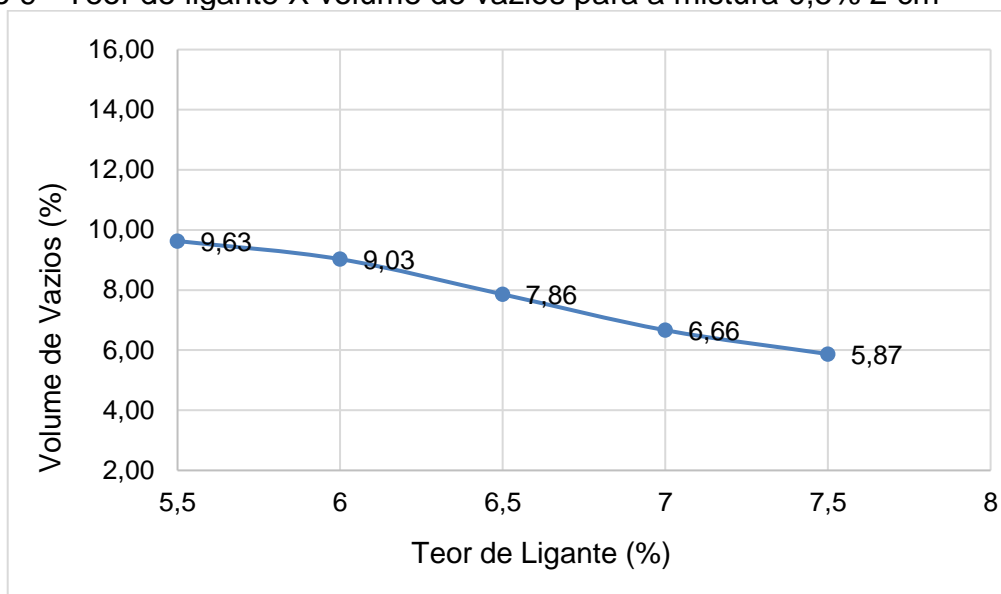
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 8 - Teor de ligante X volume de vazios para a mistura 1% 1 cm



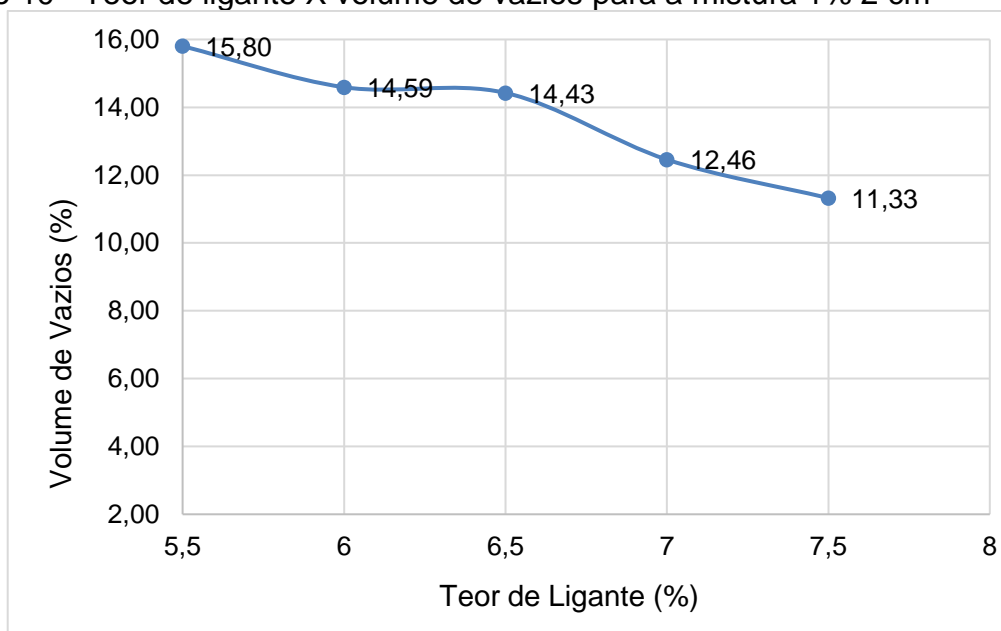
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 9 - Teor de ligante X volume de vazios para a mistura 0,5% 2 cm



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 10 - Teor de ligante X volume de vazios para a mistura 1% 2 cm



Fonte: Elaboração própria

Analisando os gráficos, percebe-se que para a mistura convencional o teor de ligante ótimo encontrado foi de aproximadamente 6,80%, teor de ligante que proporciona um volume de vazios igual a 4%.

Para as outras misturas, observa-se que o volume de vazios encontrado resultou em valores elevados, não se conseguindo estabelecer o teor de ligante ótimo que proporciona um volume de vazios igual a 4%, conforme descrito no item 3.2.2.3. Percebe-se que quanto maior a porcentagem de fibras, maior o volume de vazios, uma vez que, quanto maior a quantidade de fibras, maior a dificuldade em compactar.

Conforme os resultados encontrados, realizou-se os ensaios mecânicos para todos os corpos de prova moldados, podendo assim conhecer o comportamento mecânico dos mesmos. Teores mais altos de ligante não foram testados, pois na prática isso poderia resultar em misturas susceptíveis ao afundamento de trilha de roda por exsudação de ligante.

### **4.3 Caracterização Mecânica das Misturas**

Para avaliar o comportamento mecânico das misturas asfálticas com adições de fibras de capimannoni, realizaram-se ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral com todos os corpos de prova moldados. As Tabelas 27, 28, 29, 30 e 31 apresentam o módulo de resiliência dos corpos de prova, obtidos conforme a equação 10, no item 3.2.4.1.

Tabela 27 - Módulo de resiliência da mistura convencional

Teor de Ligante (%)	CP	MR (MPa)	MR (MPa)
5,5	13	8043	8161
	14	8052	
	15	8389	
6	7	7723	7906
	8	8533	
	9	7462	
6,5	1	8977	7576
	2	7959	
	3	5793	
7	4	6665	7385
	5	7439	
	6	8050	
7,5	10	6263	6488
	11	6891	
	12	6311	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 28 - Módulo de Resiliência da mistura 0,5% 1 cm

Teor de Ligante (%)	CP	MR (MPa)	MR (MPa)
5,5	31	4860	4618
	32	4635	
	33	4358	
6	34	5413	4941
	35	4617	
	36	4792	
6,5	37	5089	4716
	38	4507	
	39	4551	
7	40	4185	4881
	41	6451	
	42	4008	
7,5	43	4497	5682
	44	6703	
	45	5847	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 29 - Módulo de resiliência da mistura 1% 1 cm

<b>Teor de Ligante (%)</b>	<b>CP</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>MR (MPa)</b>
5,5	28	3574	3192
	29	2919	
	30	3084	
6	25	3308	3450
	26	3530	
	27	3513	
6,5	16	4786	4455
	17	4821	
	18	3757	
7	19	3920	3904
	20	3869	
	21	3923	
7,5	22	7241	5273
	23	4427	
	24	4150	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 30 - Módulo de resiliência da mistura 0,5% 2 cm

<b>Teor de Ligante (%)</b>	<b>CP</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>MR (MPa)</b>
5,5	46	5503	5740
	47	6143	
	48	5575	
6	49	3512	4095
	50	4405	
	51	4368	
6,5	52	4239	4443
	53	4962	
	54	4127	
7	55	6916	6010
	56	6506	
	57	4609	
7,5	58	4400	5462
	59	5369	
	60	6617	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 31 - Módulo de resiliência da mistura 1% 2 cm

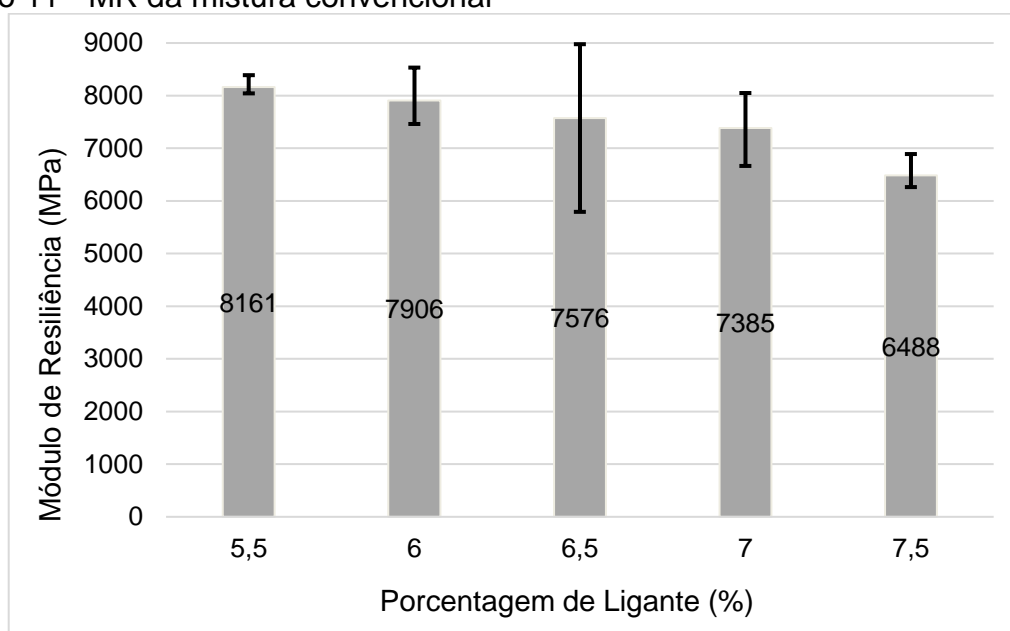
<b>Teor de Ligante (%)</b>	<b>CP</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>MR (MPa)</b>
5,5	61	2640	3118
	62	3169	
	63	3546	
6	64	3800	3269
	65	2969	
	66	3039	
6,5	67	4087	3402
	68	3400	
	69	2720	
7	70	3617	3481
	71	2945	
	72	3880	
7,5	73	3023	3106
	74	3347	
	75	2949	

Fonte: Elaboração própria

Os Gráficos 11, 12, 13, 14 e 15 apresentam os dados das tabelas 27, 28, 29, 30 e 31, onde relaciona o módulo de resiliência com os teores de ligante (%) para cada mistura da pesquisa.

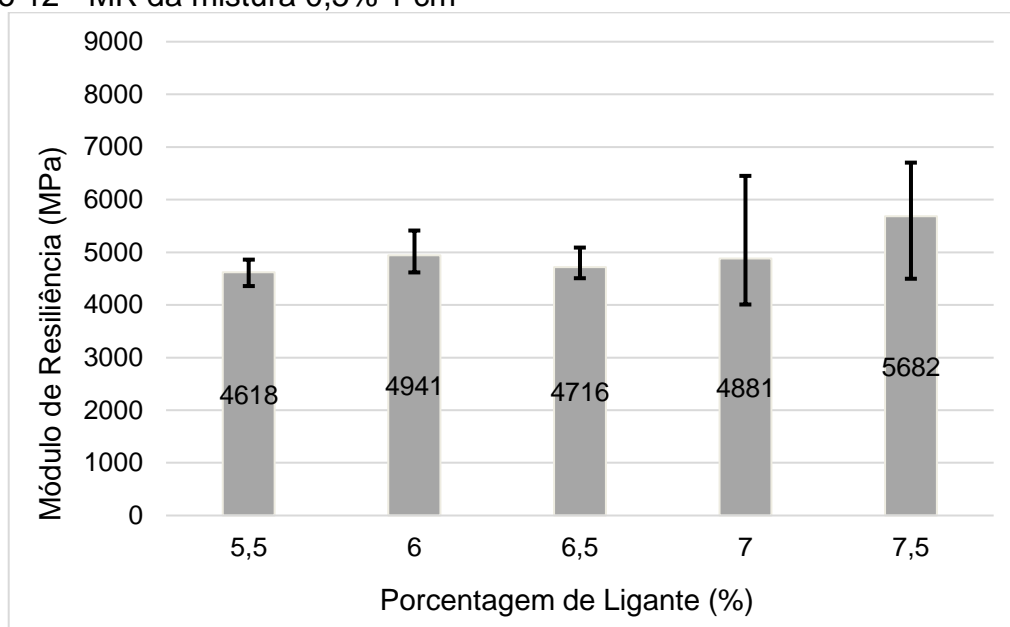
Para cada uma das médias dos gráficos, adicionou-se uma barra de erros, onde o valor positivo corresponde a variação entre o maior valor de MR e a média, e o valor negativo a variação entre a média e o menor valor de MR. Estes valores mostram a dispersão dos resultados encontrados.

Gráfico 11 - MR da mistura convencional



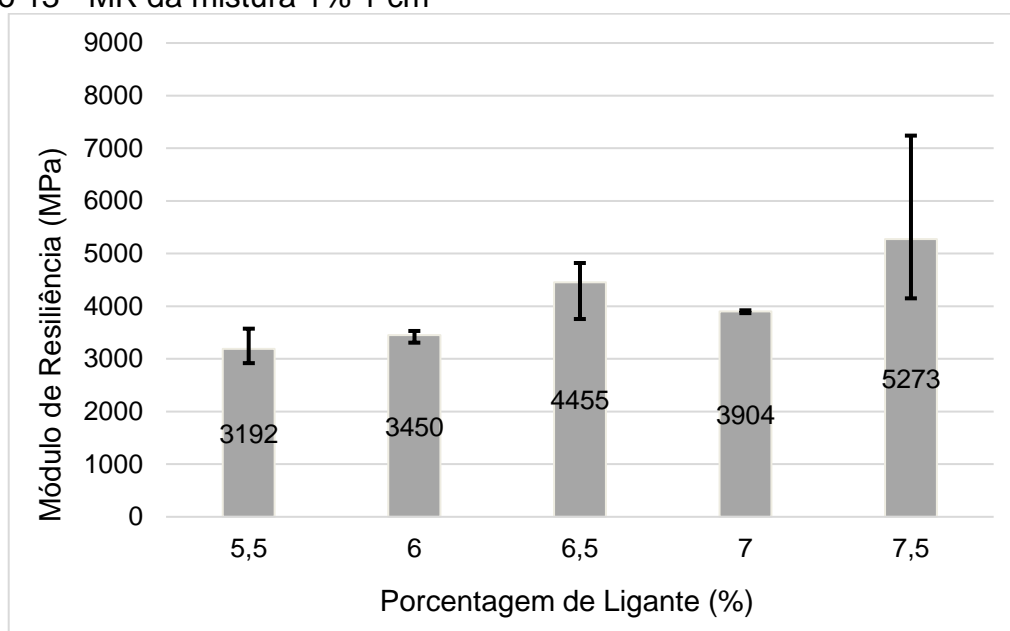
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 12 - MR da mistura 0,5% 1 cm



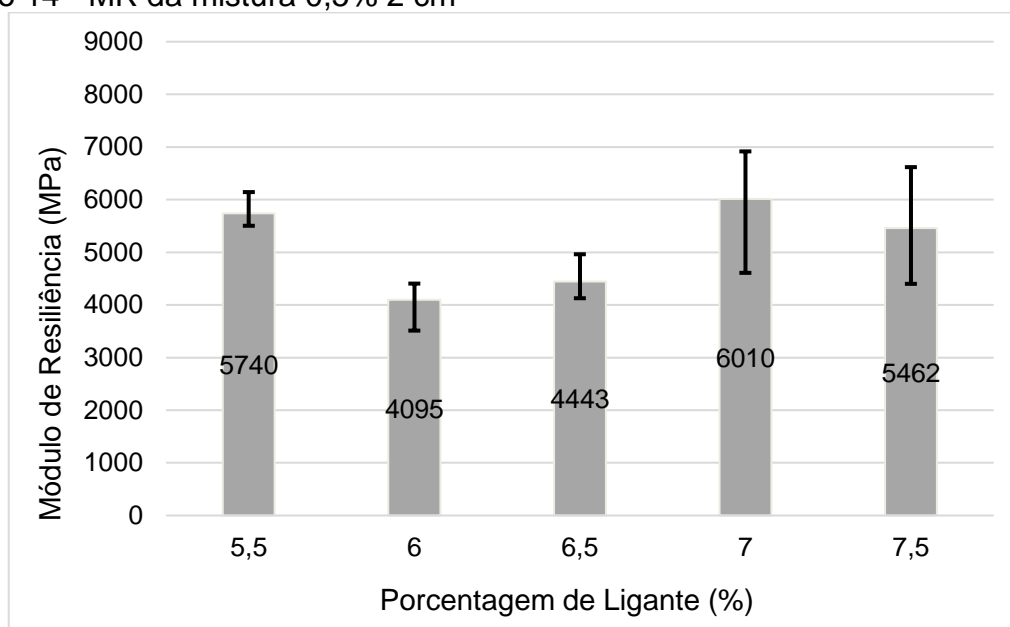
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 13 - MR da mistura 1% 1 cm



Fonte: Elaboração própria

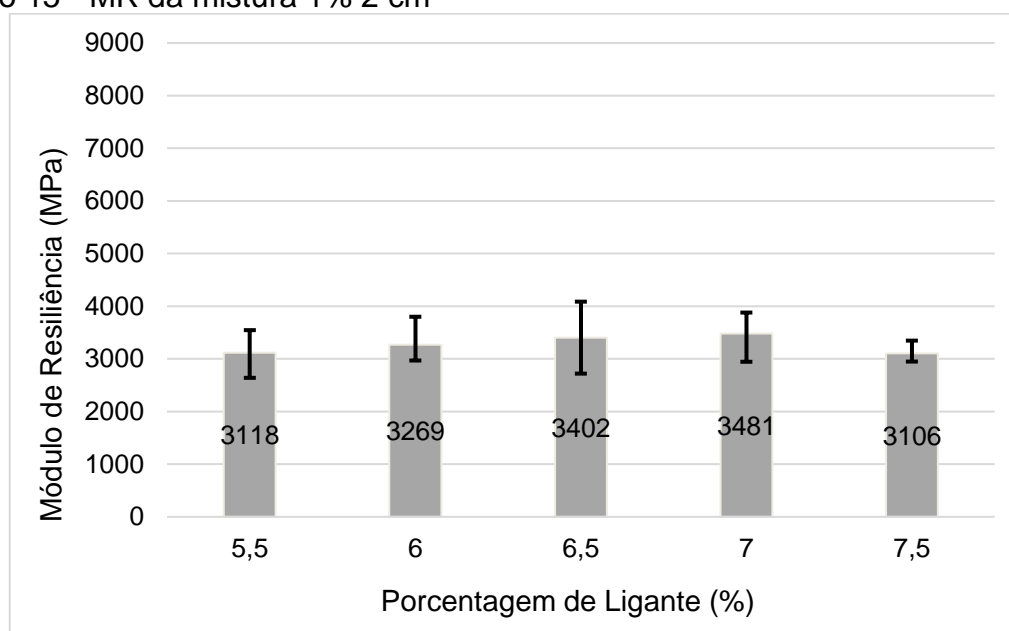
Gráfico 14 - MR da mistura 0,5% 2 cm



Fonte: Elaboração própria



Gráfico 15 - MR da mistura 1% 2 cm



Fonte: Elaboração própria

Analisando os gráficos 11, 12, 13, 14 e 15 de módulo de resiliência, observa-se que os valores encontrados para a porcentagem de 1% são inferiores aos valores encontrados para a porcentagem de 0,5%, para ambos os comprimentos de fibra. Em relação ao comprimento da fibra, as misturas com 2 cm de comprimento apresentam menores valores de módulo de resiliência em relação as misturas com 1 cm, exceto na mistura de 0,5% 2 cm que dois teores de ligante apresentou valores maiores que a mistura 0,5% 1 cm. Estes resultados mostram coerência, uma vez, que quanto maior a porcentagem e o comprimento de fibra, menor é o módulo de resiliência obtido pelo aumento do volume de vazios dentro da mistura.

Fazendo uma comparação aos valores de módulo de resiliência das misturas com e sem fibras, percebe-se que a adição de fibras diminui a rigidez da mistura asfáltica.

As Tabelas 32, 33, 34, 35 e 36 apresentam os valores encontrados para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, apresentado no item 3.2.4.2, onde são mostrados os valores de RT para cada corpo de prova e a média dos três corpos de prova para cada teor de ligante.

Tabela 32 - RT da mistura convencional

<b>MISTURA CONVENCIONAL</b>			
<b>Teor de Ligante (%)</b>	<b>CP</b>	<b>RT (MPa)</b>	<b>RT (MPa)</b>
5,5	13	1,21	1,25
	14	1,40	
	15	1,13	
6	7	1,40	1,28
	8	1,08	
	9	1,35	
6,5	1	1,22	1,33
	2	1,26	
	3	1,52	
7	4	1,36	1,29
	5	1,40	
	6	1,12	
7,5	10	1,57	1,41
	11	1,42	
	12	1,26	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 33 - RT da mistura 0,5% 1 cm

<b>Teor de Ligante (%)</b>	<b>CP</b>	<b>RT (MPa)</b>	<b>RT (MPa)</b>
5,5	31	0,87	0,87
	32	0,83	
	33	0,90	
6	34	0,75	0,74
	35	0,75	
	36	0,71	
6,5	37	0,89	0,90
	38	0,89	
	39	0,91	
7	40	0,90	0,92
	41	0,88	
	42	0,99	
7,5	43	0,70	0,87
	44	0,96	
	45	0,95	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 34 - RT da mistura 1% 1 cm

Teor de Ligante (%)	CP	RT (MPa)	RT (MPa)
5,5	28	0,63	0,56
	29	0,53	
	30	0,52	
6	25	0,50	0,56
	26	0,59	
	27	0,59	
6,5	16	0,55	0,50
	17	0,45	
	18	0,49	
7	19	0,67	0,62
	20	0,57	
	21	0,63	
7,5	22	0,56	0,60
	23	0,64	
	24	0,60	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 35 - RT da mistura 0,5% 2 cm

Teor de Ligante (%)	CP	RT (MPa)	RT (MPa)
5,5	46	0,95	0,95
	47	0,92	
	48	0,97	
6	49	0,86	1,01
	50	1,13	
	51	1,04	
6,5	52	1,03	1,08
	53	1,09	
	54	1,11	
7	55	1,13	1,01
	56	0,96	
	57	0,94	
7,5	58	0,98	1,00
	59	1,01	
	60	1,03	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 36 - RT da mistura 1% 2 cm

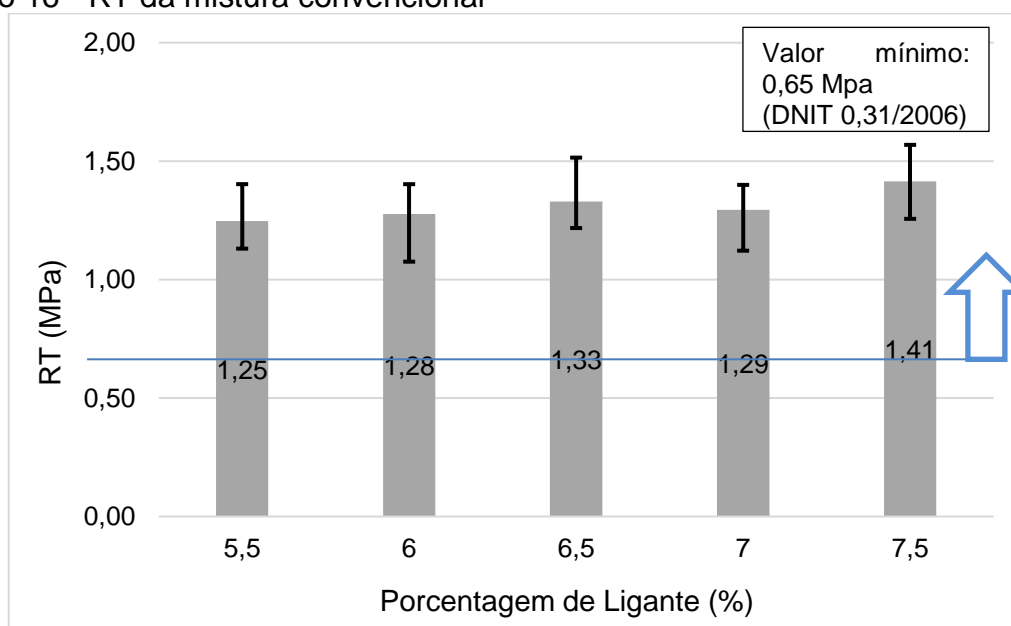
Teor de Ligante (%)	CP	RT (MPa)	RT (MPa)
5,5	61	0,70	0,72
	62	0,75	
	63	0,71	
6	64	0,69	0,73
	65	0,72	
	66	0,78	
6,5	67	0,71	0,81
	68	0,80	
	69	0,91	
7	70	0,82	0,79
	71	0,81	
	72	0,74	
7,5	73	0,88	0,87
	74	0,90	
	75	0,82	

Fonte: Elaboração própria

Os gráficos 16, 17, 18, 19 e 20 retratam os dados das tabelas 32, 33, 34, 35 e 36, relacionando a média do valor de RT com o teor de ligante (%) correspondente para cada mistura proposta.

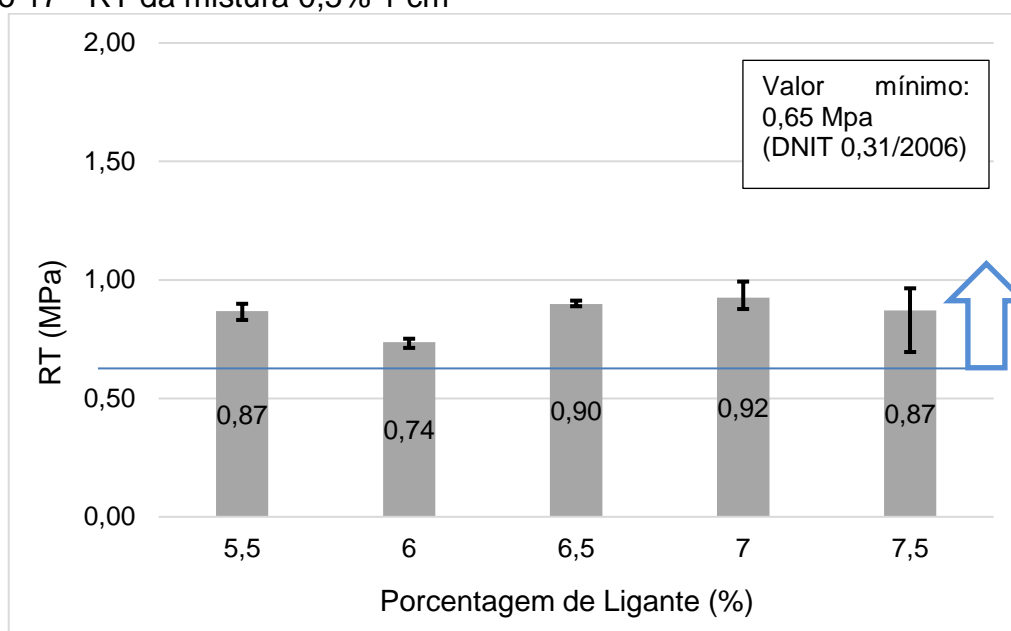
Como realizado para o módulo de resiliência, também considerou a dispersão dos valores encontrados, adicionando uma barra de erros nos gráficos.

Gráfico 16 - RT da mistura convencional



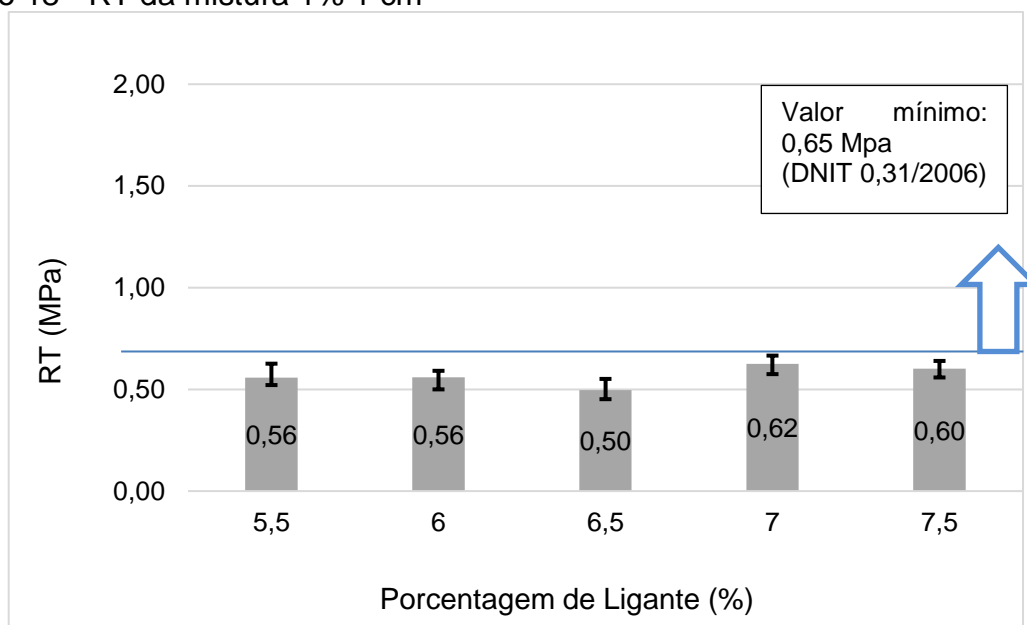
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 17 - RT da mistura 0,5% 1 cm



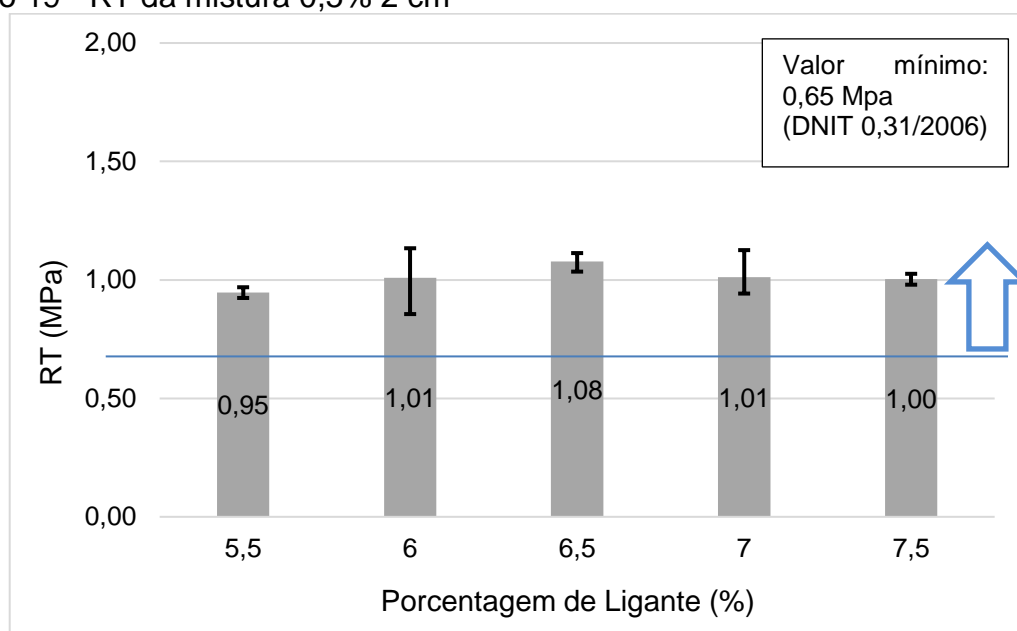
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 18 - RT da mistura 1% 1 cm



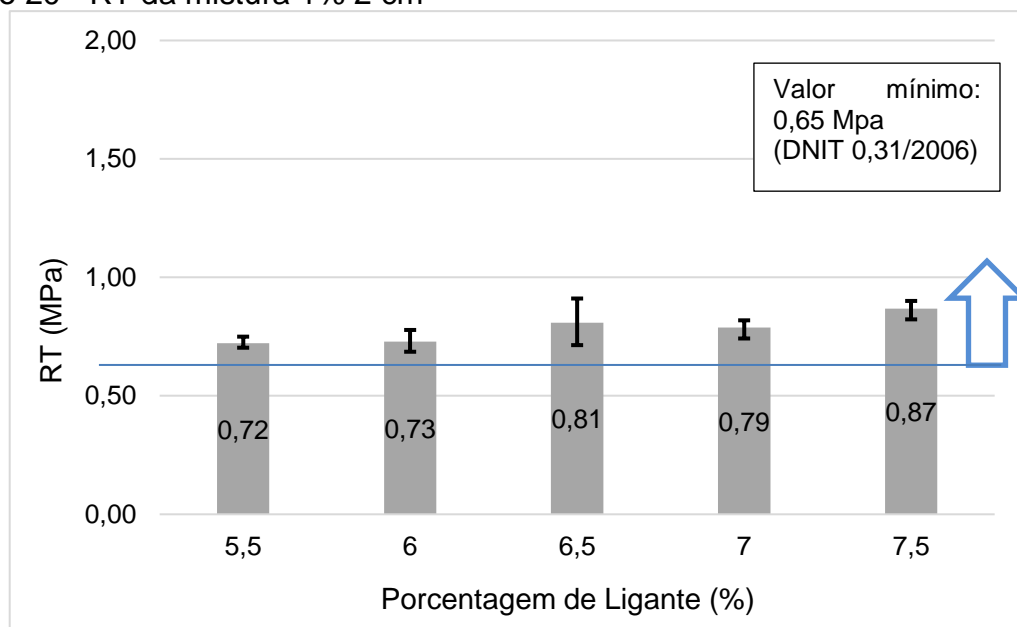
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 19 - RT da mistura 0,5% 2 cm



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 20 - RT da mistura 1% 2 cm



Fonte: Elaboração própria

Analisando os gráficos de RT, nota-se que os maiores valores de RT foram da mistura convencional e quanto às misturas com fibras, as que possuem 1% de fibra apresentaram menor valor, e as misturas com um comprimento maior, de 2 cm,

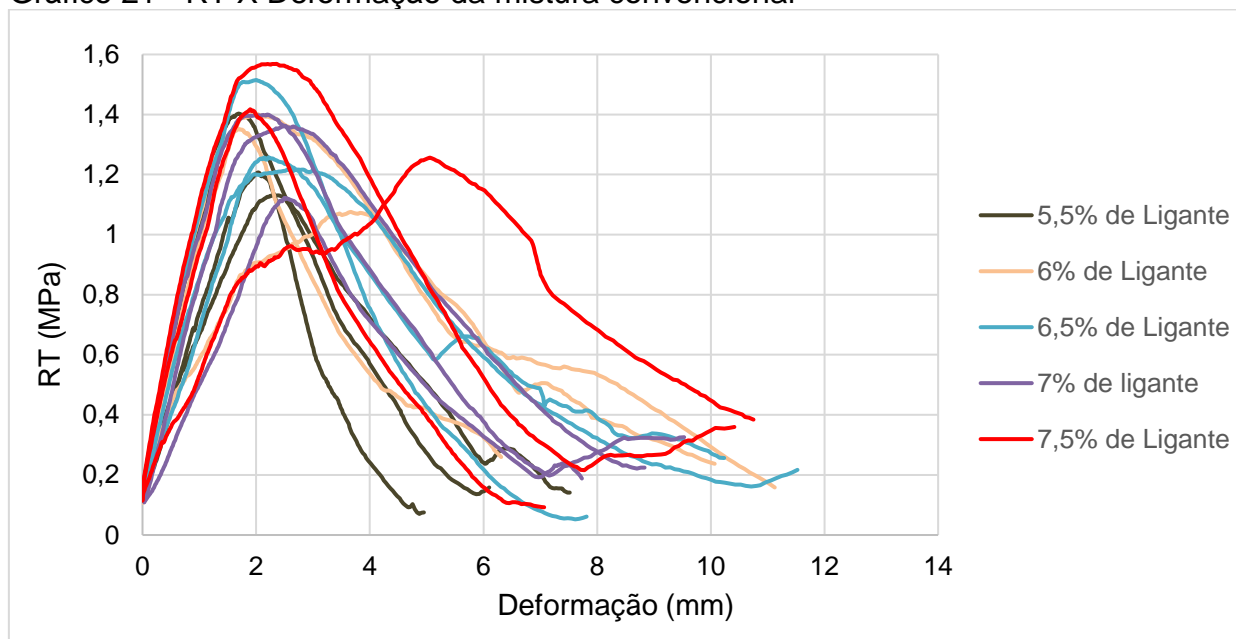
apresentaram um maior valor de RT. Percebe-se também, que de todos os teores analisados, o teor de 5,5% de ligante apresenta menor valor de RT, o mesmo explica-se pelo fato que o teor de ligante era baixo, não permitindo uma boa aderência entre todos os materiais nas misturas.

É importante salientar que o ensaio de RT foi realizado para todos os corpos de prova, sendo três corpos de prova para cada teor de ligante, pois não foi possível determinar o teor ótimo de ligante ao volume de vazios correspondentes a 4%.

Além disso, segundo a especificação de serviço da norma DNIT 031/2006, o valor mínimo limite para camada de rolamento de RT é 0,65 Mpa para uma temperatura a 25 °C e volume de vazios igual a 4%. Conforme os resultados encontrados, a única mistura que não foi atendido o valor mínimo exigido pelo DNIT, foi a mistura 1% 1 cm de fibra.

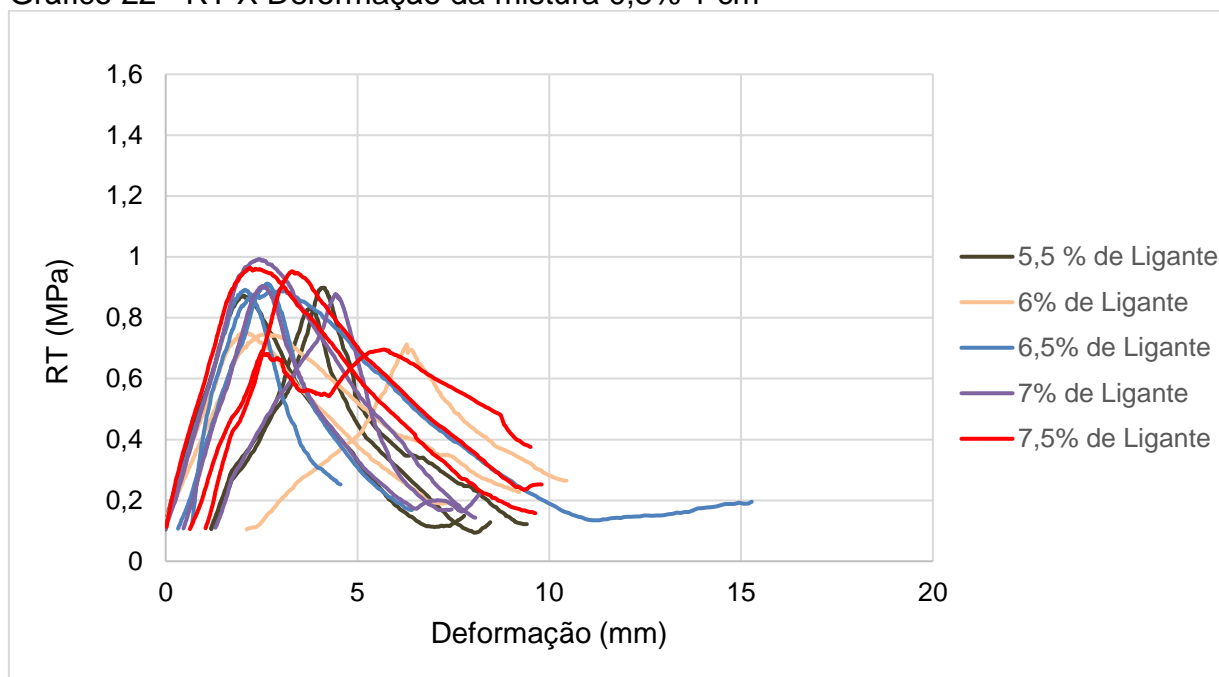
Durante a realização do ensaio de RT, foi feita a captura da carga resistida pelas amostras até o fim do ensaio. Com estes dados, é possível além de verificar qual a resistência máxima, também observar o comportamento Tensão X Deformação das amostras.

Gráfico 21 - RT X Deformação da mistura convencional



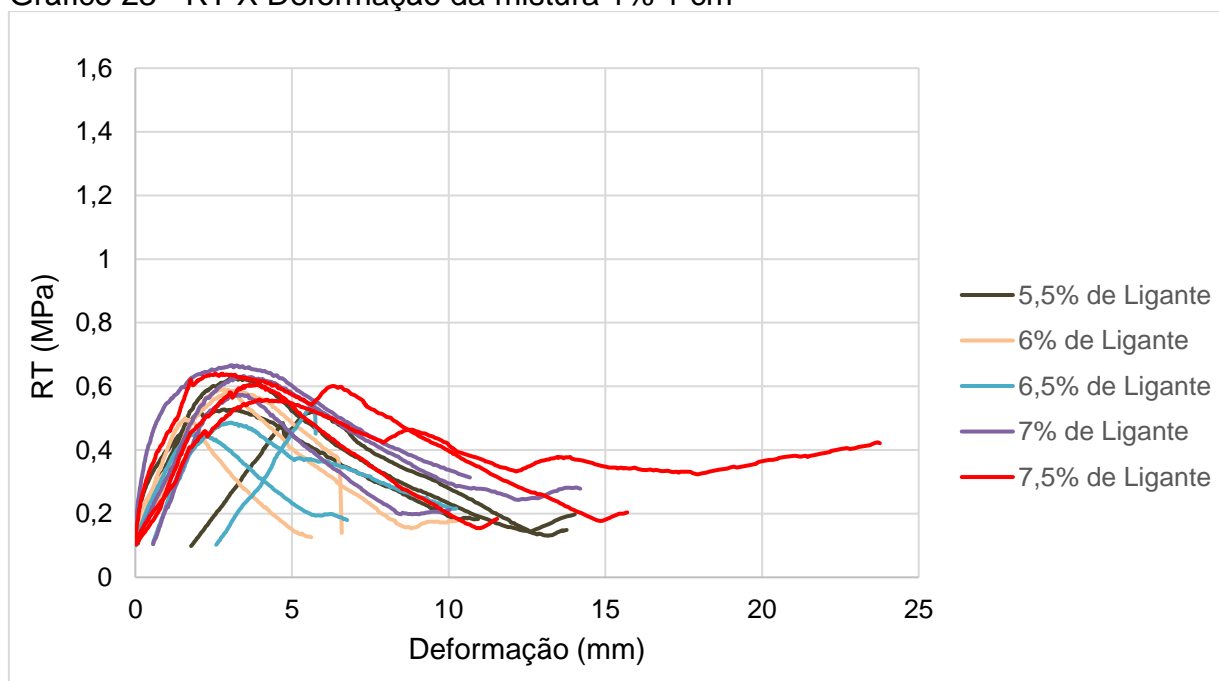
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 22 - RT X Deformação da mistura 0,5% 1 cm



Fonte: Elaboração própria

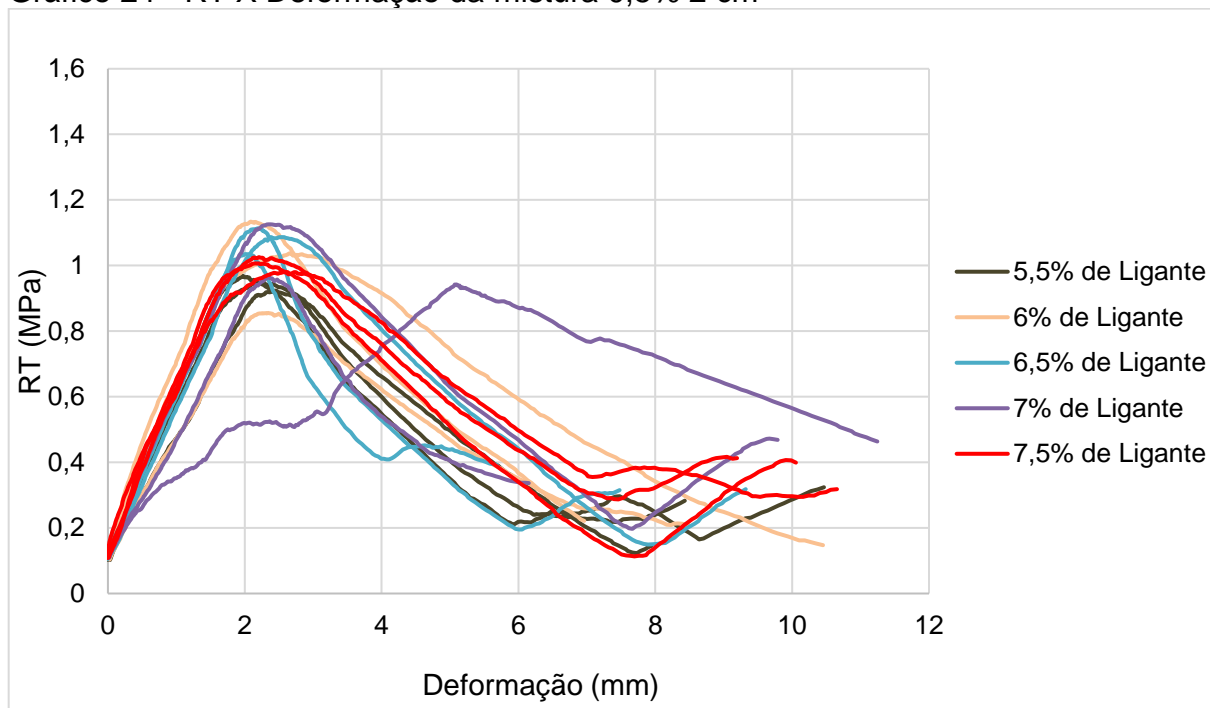
Gráfico 23 - RT X Deformação da mistura 1% 1 cm



Fonte: Elaboração própria

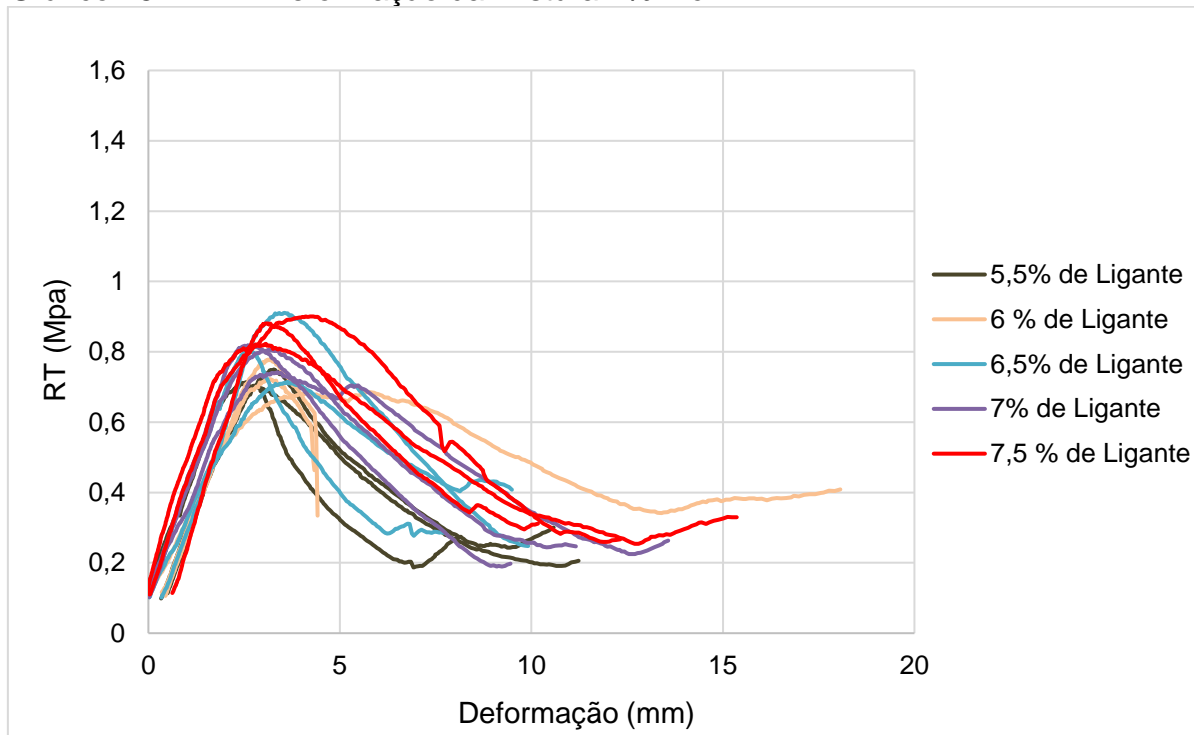


Gráfico 24 - RT X Deformação da mistura 0,5% 2 cm



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 25 - RT X Deformação da mistura 1% 2 cm



Fonte: Elaboração própria

Conforme os gráficos, é possível verificar que as misturas com adição de fibras suportam maiores deformações sem que haja a separação dos corpos de provas,

onde em alguns corpos de provas, em deformações maiores que 20 mm, ainda resistem a um carregamento considerável.

Uma outra relação que pode ser analisada é o MR/RT que é um importante parâmetro na comparação de misturas asfálticas, indicando a compatibilidade entre a rigidez e a resistência à tração da mistura. A Tabela 37 representa os valores da relação MR/RT das misturas asfálticas, considerando a relação para cada teor de ligante. Os valores de MR e RT para cada teor de ligante apresentado na tabela já representa a média dos três corpos de prova.

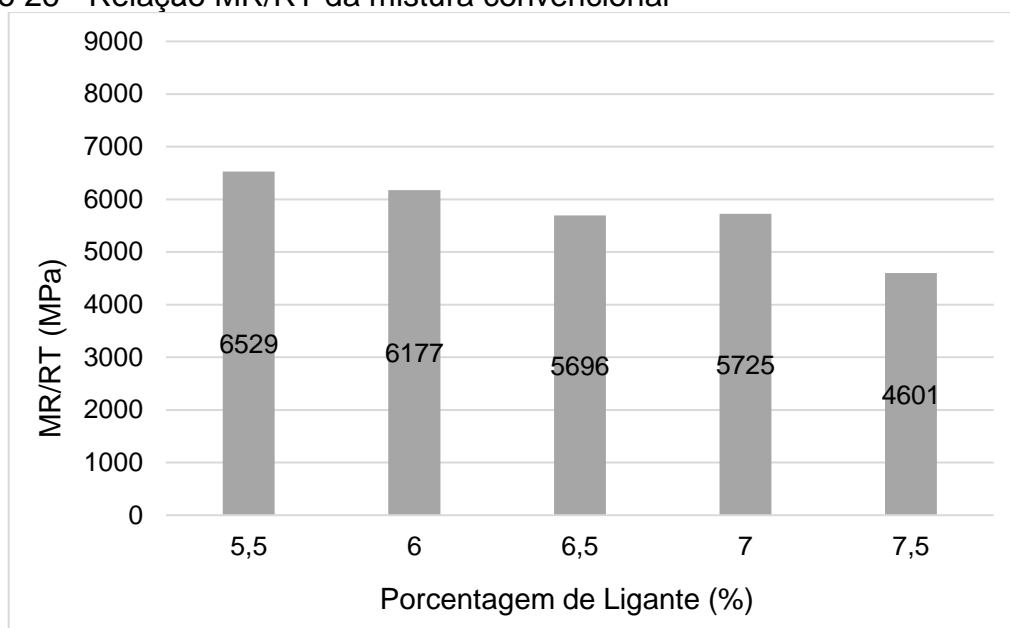
Tabela 37 - Relação MR/RT das misturas

<b>Mistura</b>	<b>Porcentagem de Ligante (%)</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>RT (MPa)</b>	<b>MR/RT (MPa)</b>
Convencional	5,5	8161	1,25	6529
	6	7906	1,28	6177
	6,5	7576	1,33	5696
	7	7385	1,29	5725
	7,5	6488	1,41	4601
0,5% 1 cm	5,5	4618	0,87	5308
	6	4941	0,74	6677
	6,5	4716	0,9	5240
	7	4881	0,92	5305
	7,5	5682	0,87	6531
1% 1 cm	5,5	3192	0,56	5700
	6	3450	0,56	6161
	6,5	4455	0,5	8910
	7	3904	0,62	6297
	7,5	5273	0,6	8788
0,5% 2 cm	5,5	5740	0,95	6042
	6	4095	1,01	4054
	6,5	4443	1,08	4114
	7	6010	1,01	5950
	7,5	5462	1	5462
1% 2 cm	5,5	3118	0,72	4331
	6	3269	0,73	4478
	6,5	3402	0,81	4200
	7	3481	0,79	4406
	7,5	3106	0,87	3570

Fonte: Elaboração própria

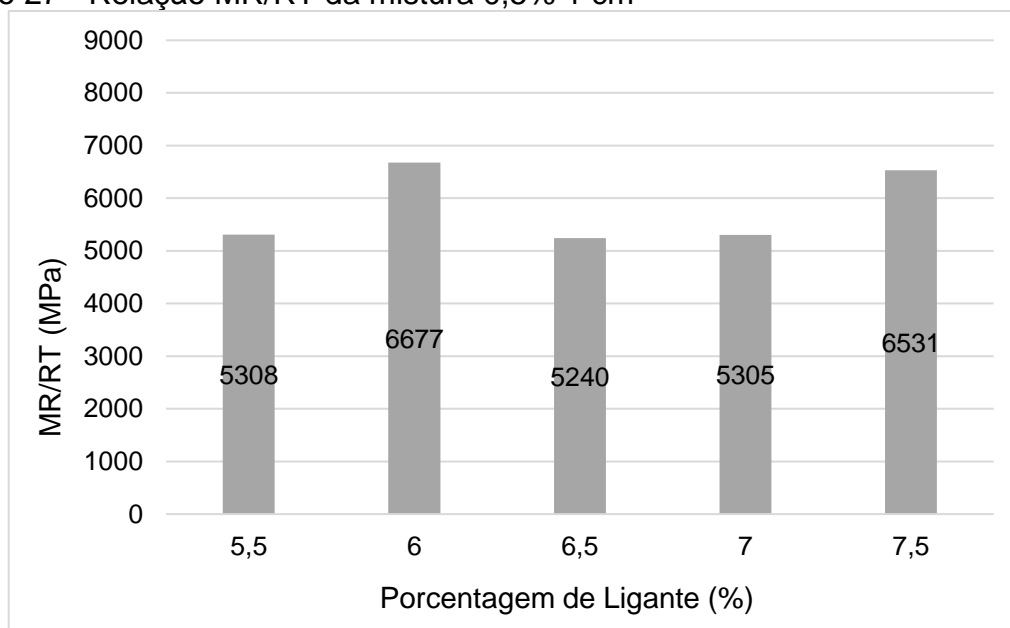
Os Gráficos 26, 27, 28, 29 e 30 retratam os dados da tabela 37, relacionando os valores de MR/RT com o teor de ligante (%) para cada mistura da pesquisa.

Gráfico 26 - Relação MR/RT da mistura convencional



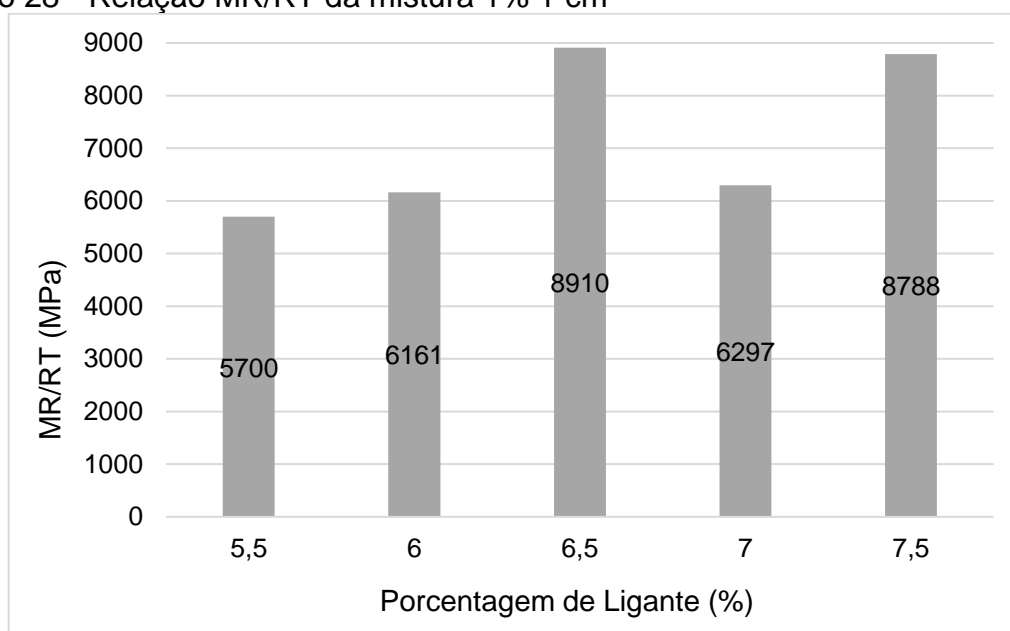
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 27 - Relação MR/RT da mistura 0,5% 1 cm



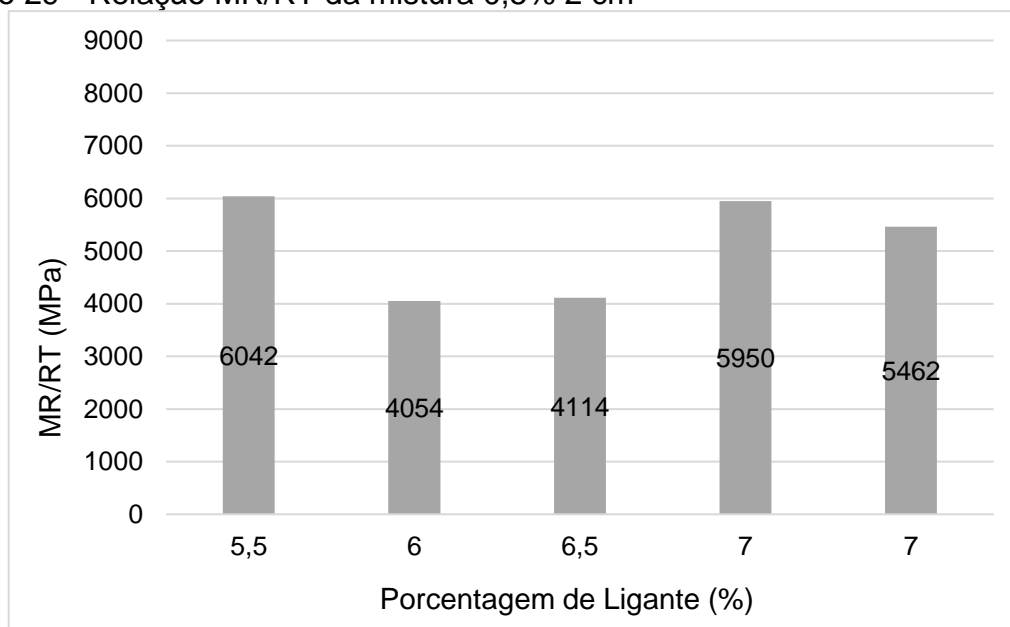
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 28 - Relação MR/RT da mistura 1% 1 cm



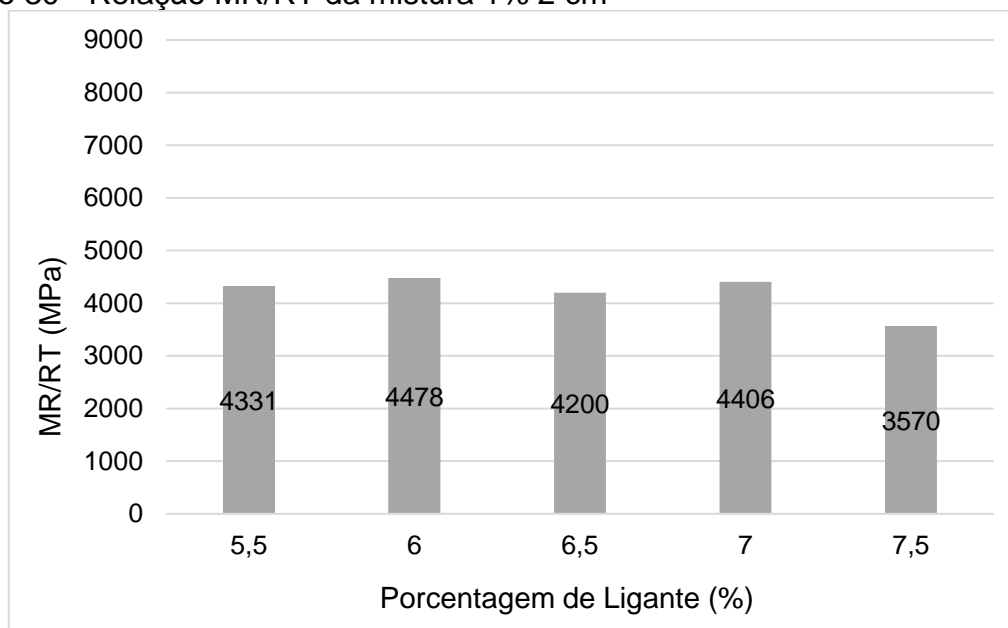
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 29 - Relação MR/RT da mistura 0,5% 2 cm



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 30 - Relação MR/RT da mistura 1% 2 cm



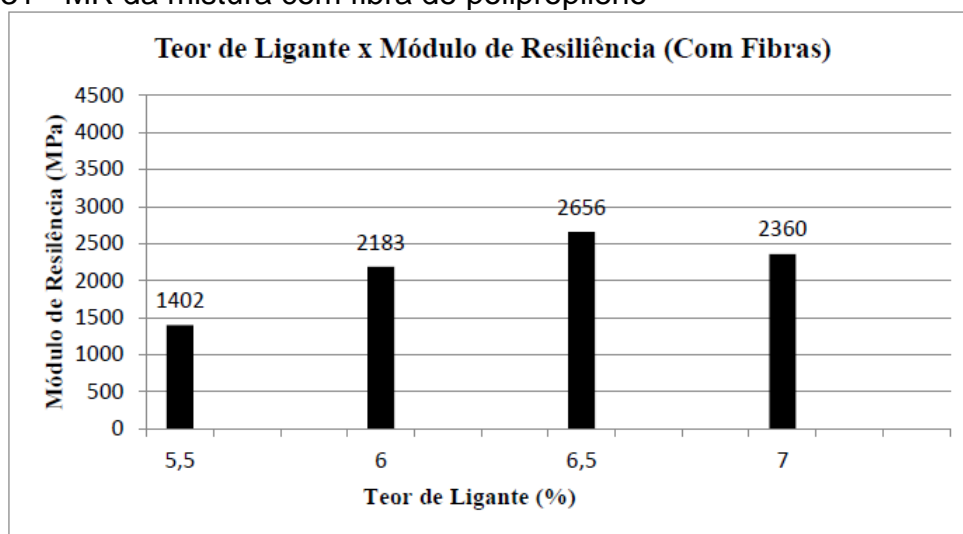
Fonte: Elaboração própria

Segundo Bernucci et al. (2008), a relação MR/RT vem sendo utilizada como um indicador de vida de fadiga de misturas asfálticas, sendo desejável um valor pequeno, pois, busca-se baixa rigidez, para evitar elevada absorção de tensões que levam ao trincamento precoce do revestimento, e alta resistência à tração, associada a uma maior resistência à fadiga.

Analisando os gráficos, percebe-se que em todas as misturas a relação MR/RT resultou em valores altos, onde para um teor de ligante na mistura 0,5% 2 cm obteve-se uma relação próxima de 3000, em que para Santos (2005), relações de MR/RT na ordem de 3000 representam materiais que são flexíveis enquanto possuam uma boa resistência à tração.

Fazendo uma comparação com a pesquisa de Heck (2015), em que utilizou a adição de fibra sintética de polipropileno na mistura asfáltica, pode-se observar o Gráfico 31 que mostra os valores encontrados de módulo de resiliência para a mistura com adição da fibra sintética, onde todos os valores foram inferiores aos valores encontrados para módulo de resiliência com adição de fibra de capimannoni, sendo a mistura com fibra de capim mais rígida do que com fibra de polipropileno.

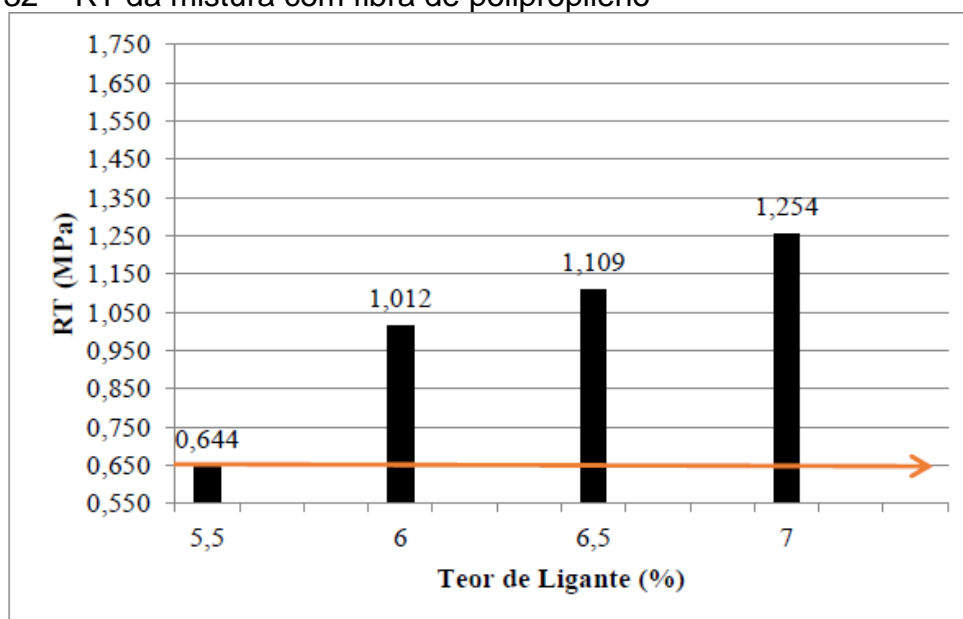
Gráfico 31 - MR da mistura com fibra de polipropileno



Fonte: Heck (2015, p.66)

Quanto aos valores encontrados para a resistência à tração por compressão diametral da mistura com fibra de polipropileno, exposto no Gráfico 32, são valores próximos encontrado para a mistura com adição 0,5% 2 cm de fibra de capim annoni e valores superiores para as demais adições com fibra de capim.

Gráfico 32 – RT da mistura com fibra de polipropileno



Fonte: Heck (2015, p.68)

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para analisar o comportamento da fibra de capimannoni, o ensaio de resistência à tração foi realizado em diferentes temperaturas de secagem do capimannoni: TA, 60 °C, 100 °C e 150 °C e em três partes do vegetal: folhas, parte superior e parte inferior. As maiores tensões calculadas foram para a parte superior e inferior, ficando a parte das folhas a menos resistente. A temperatura de exposição da fibra resultou em menores resistências nas maiores temperaturas, sendo a temperatura de 60 °C com as maiores tensões encontradas. Também foi determinado o módulo de elasticidade das fibras, onde o menor valor encontrado foi para a parte das folhas.

Para encontrar o teor ótimo de ligante de cada mistura, foram analisadas as características volumétricas dos corpos de prova. Para a mistura convencional foi possível determinar o teor de ligante, obtendo-se um teor de 6,80% de ligante aproximadamente. Já para as outras misturas com adição de fibras não foi possível determinar o teor ótimo de ligante correspondente aos 4% de volume de vazios, o mesmo poderia ser calculado como sendo a soma do teor ótimo de ligante da mistura convencional e o índice de absorção das fibras que estariam sendo adicionadas. O volume de vazios encontrado para essas misturas pode ser justificado pela dificuldade em compactar com esse tipo de fibra.

Após, foi realizado para as cinco misturas o módulo de resiliência, sendo que a mistura convencional apresentou os maiores valores, seguidos da adição de 0,5% 1 cm, 0,5% 2 cm, 1% 1 cm e 1% 2 cm. Essa diferença entre módulo de resiliência das misturas com e sem fibras, pode ser justificado pelo fato em que as fibras tendem a absorver parte do ligante, formando uma espécie de capa em torno da fibra deixando impermeável, mas com vazios dentro da sua estrutura, onde se encontra ar aprisionado, diminuindo a rigidez do conjunto.

Em relação à resistência à tração por compressão diametral, os resultados indicaram que a mistura convencional obteve maiores valores de pico em relação as demais misturas, seguidas das misturas 0,5% 2 cm, 0,5% 1 cm, 1% 2 cm e 1% 1 cm. Somente a mistura 1% 1 cm que não foi atendido o limite mínimo de RT aplicada para a camada de rolamento. De modo geral, as misturas com adições de fibras possuem menores valores de RT em relação à mistura convencional, porém, a fibra suporta maiores deformações em um período de tempo.

Quanto à relação MR/RT das misturas, encontrou-se valores elevados, sendo desejável um valor pequeno, pois busca-se baixa rigidez para evitar elevada absorção que levam ao trincamento precoce do pavimento, e alta resistência à tração, ocasionando uma maior resistência à fadiga. Porém, deve-se realizar outras análises e outros ensaios, como vida de fadiga.

Comparando os resultados com a pesquisa de Heck (2015), que estudou a adição de fibra sintética de polipropileno na mistura asfáltica, é possível observar que o maior valor encontrado de RT na mistura com adição de polipropileno é de 1,2 MPa, próximo ao valor encontrado para a mistura com a adição 0,5% 2 cm de fibra de capim, e para o MR, o valor encontrado com fibra de polipropileno é de 2656 MPa, inferior aos valores encontradas para as misturas com adição de fibra de capim annoni, apresentando uma maior rigidez na mistura do que com a fibra sintética.

Dessa forma, pode-se dizer que a adição de fibras de capim annoni às misturas asfálticas como material de reforço é eficaz, porém outros ensaios com as misturas devem ser realizados para comprovar se o comportamento da fibra viabilizará sua utilização.

### **5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Como sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar a influência da fibra de capim annoni em misturas de pré-misturado a frio, visto que é uma técnica bem difundida na região de Alegrete, principalmente para operações de restauração do tipo “tapa buraco”;
- Realizar o ensaio de vida de fadiga, para verificar se realmente a fibra irá proporcionar um aumento da vida útil quanto ao trincamento;
- Realizar ensaios de deformação permanente;
- Avaliar se ligantes modificados com borracha ou com polímeros poderiam ter um comportamento mais favorável;
- Utilizar outros tipos de fibras vegetais para efeitos comparativos;
- Realizar trechos experimentais para verificar ao longo do tempo o desempenho quando solicitado ao tráfego real.



## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA USP. **Sisal é alternativa de baixo custo para compor alvenaria**. 2011. Disponível em: <<http://www.ciflorestas.com.br/conteudo.php?id=5338>>. Acesso em: 25 mai. 2016.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JR., H. **A experiência brasileira com as fibras vegetais**. 1998. Disponível em: <<http://www.piniweb.com.br/construcao/noticias/a-experiencia-brasileira-com-as-fibras-vegetais-85326-1.asp>>. Acesso em: 13 abr. 2016.

ALFAYA, H.; SUÑÉ, L. N. P.; SIQUEIRA, C. M. G. **Efeito da amonização com ureia sobre os parâmetros de qualidade do feno do capim-annoni 2 (Eragrostis plana Nees)**. 2002. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-35982002000400006](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-35982002000400006)>. Acesso em: 15 abr. 2016.

AQUINO, R. C. M. P. **Desenvolvimento de Compósitos de Fibras de Piaçava da Espécie Attalea Funifera Mart e Matriz de Resina Poliéster**. 2003. 150f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goitacazes, Rio de Janeiro, 2003.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1.ed. São Paulo, SP, 2007

BENINI, K. C. C. C. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas: HIPS/fibras da casca de coco verde e bagaço de cana de açúcar**. 2011. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

BERNUCCI, L. D. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

BEVITORI, A. B. **Avaliação das Propriedades e Estrutura de Fibras de Rami e Seus Compósitos Poliméricos**. 2014. 120f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goitacazes, Rio de Janeiro, 2014.

BLEDZKI, A. K., GASSAN, J. **Composites reinforced with cellulose based fibers**. *Progress In Polymer Science*. 24: 221-274. 1999.

BORLINI, M. C. **Incorporação de Cinza de Bagaço de Cana de Açúcar em massa cerâmica argilosa**. 2006. 207f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2006.

BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes modificados**. 2016. 101f. Doutorado (Qualificação de doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L. P. **Pavimentos Rodoviários**. 1 ed. Coimbra: Almedina, 2006.

BRANDÃO, A. T. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos de polipropileno reforçados com fibras do bagaço de cana-de-açúcar**. 2015. 58f. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA, Volta Redonda, 2015.

CARVALHO, J. M. M. **Aproveitamento do Coco Verde**. Apoio do BNB à pesquisa e desenvolvimento da fruticultura regional. Disponível em: <[http://www.bnb.gov.br/projwebren/exec/livroPDF.aspx?cd\\_livro=132](http://www.bnb.gov.br/projwebren/exec/livroPDF.aspx?cd_livro=132)>. Acesso em: 10 abr. 2016.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de Solos Reforçados com Fibras Submetidos a Grandes Deformações**. 2005. 243f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CICLO VIVO. **Brasileiro descobre que bagaço de cana de açúcar pode purificar água**. 2013. Disponível em: <<http://ciclovivo.com.br/noticia/brasileiro-descobre-que-bagaco-de-cana-de-acucar-pode-purificar-agua/>>. Acesso em: 25 mai. 2016.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2016**. Disponível em: <[http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20\(2016\)%20-%20LOW.pdf](http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20(2016)%20-%20LOW.pdf)>. Acesso em: 27 jun. 2017.

COLLETTI, M. N. B. F.; YUBA, A. N. **Aplicação de Fibras Naturais na Arquitetura: Levantamento e Análise preliminar de sustentabilidade para o Estado de Mato Grosso do Sul**. 2009. Disponível em: <<http://www.propp.ufms.br/gestor/titan.php?target=openFile&fileId=523>>. Acesso em: 06 abr. 2016.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 083/98. **Agregados – análise granulométrica**, 1998. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me>>. Acesso em: 10 mai. 2016.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 043/95. **Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall**, 1995.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 081/98. **Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**, 1998.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 194/98. **Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**, 1998.

DNIT. **Manual de pavimentação**. 3 ed. Rio de Janeiro, RJ, 2006a. 274 p.

\_\_\_\_\_. **Manual de restauração de pavimentos flexíveis**. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ, 2006b. 310 p.

\_\_\_\_\_. DNIT 031/2006 ES. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**, 2006.

\_\_\_\_\_. DNIT 117/2010 ME. **Pavimentação asfáltica – Mistura betuminosa – Determinação da densidade aparente**, 2010.

\_\_\_\_\_. DNIT 135/2010 ME. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**, 2010.

\_\_\_\_\_. DNIT 136/2010 ME. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**, 2010.

DOBBIN E. S. J; ROCHA L. F. S. **Estudo de concreto com adição de fibra de polipropileno para controle de fissuração**. 2011. 114f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade da Amazônia, Belém, 2011.

ESMERALDO, M. C. **Preparação de Novos Compósitos Suportados em Matriz de Fibra Vegetal/Natural**. 2006. 119f. Dissertação (Mestrado em Química Inorgânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

ESTEVES, J. L. **Novos Materiais e novas estruturas**. 2009. Disponível em: <[www.metes.pt/archive/doc/NovosMateriaisENovasEstruturas.ppt](http://www.metes.pt/archive/doc/NovosMateriaisENovasEstruturas.ppt)>. Acesso em: 13 abr. 2016.

FAGURY, R. V. G. **Avaliação de fibras naturais para a fabricação e compósitos: açai, coco e juta**. 2005. 80f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Pará, 2005.

FAPEAM. **Estudo conta a história da cultura da juta e malva no Brasil**. 2016. Disponível em: <<http://www.fapeam.am.gov.br/estudo-conta-a-historia-da-cultura-de-juta-e-malva-no-brasil/>>. Acesso em: 08 jun. 2016.

FERREIRA, A. T. **Uma exótica no Campo: O Capim Annoni-2 e suas Influências na Produção Pecuária da Coxilha de São Rafael, no Município de Quaraí - RS**. 2011. 54f. Trabalho de conclusão de curso (Tecnólogo em Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FINKIELSZTEJN, B. **Sistemas modulares têxteis como aproveitamento de fibras naturais - uma alternativa sustentável em arquitetura e design**. 2006. 172f. Dissertação (Mestrado em Artes e Design) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

FOCHT, T. **Ecologia e dinâmica do capim-annoni-2 (*Eragrostis plana* Nees), uma invasora dos campos sulinos: prevenção da sua expansão**. 2008. 145 f. Tese (Doutorado em Ecologia) – Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

GONÇALVES, F. P. **O Desempenho dos Pavimentos Flexíveis**. 1999. Disponível em: <<http://usuarios.upf.br/~pugliero/arquivos/09.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

GONÇALVES, D. C. S. et al. **Fibras celulósicas**. 2003. Disponível em: <<http://www.almanaquedocampo.com.br/imagens/files/fibras-celulosicas%20juta.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

GOULART, I. C. G. R.; MEROTTO JUNIOR, A.; PEREZ, N. B.; KALSING, A. **Controle de capim-annoni-2 (*Eragrostis plana*) com herbicidas pré-emergentes em**

**associação com diferentes métodos de manejo do campo nativo.** 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pd/v27n1/a23v27n1.pdf>>. Acesso: 15 abr. 2016.

GUIMARÃES, B. M. G. **Estudo das características físico-químicas de fibras têxteis vegetais de espécies de Malvaceae.** 2014. 167f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Têxtil e Moda, Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, 2014.

HAGOS, E. T. **The Effect of Aging on Binder Properties of Porous Asphalt Concrete.** 2008. 343f. Dissertation (Master of Science in Road and Transportation Engineering) – Technische Universiteit Delft, Delft, 2008.

HALL, G. A. B. **Estudos comparativos de Capim-Annoni 2 (Eragrostis plana) e Pastagem Nativa de Várzea da Região de Santa Maria, Rio Grande do Sul.** 2009. Disponível em: <<https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/viewFile/16756/11084>>. Acesso em: 15 abr. 2016.

HECK, A. F. **Análise da Viabilidade do Uso de Fibras de Polipropileno como Material de Reforço em Pavimentos Asfálticos.** 2015. 80f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

HOMEM, T. R. **Comportamento de Misturas Asfálticas Porosas com Ligantes Modificados por Polímeros e Adição de Fibras.** 2002. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

JUNIOR, L. Q. B. et al. **Avaliação do Comportamento do Ligante Asfalto-Borracha e de Fibras Naturais em Misturas Asfálticas Descontínuas.** 2006. Disponível em: <<file:///C:/Users/Usuario/Downloads/36-138-1-PB%20.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

KAWABATA, C. Y. **Aproveitamento de cinzas da queima de resíduos agroindustriais na produção de compósitos fibrosos e concreto leve para a construção rural.** 2008. 165f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2008.

LEAL, C. **Asfalto com Bagaço de Cana.** Revista Ciência Hoje. 2010. Disponível em: <[http://www.cienciahoje.org.br/revista/materia/id/421/n/pavimentacao\\_com\\_bagaco\\_d\\_e\\_cana](http://www.cienciahoje.org.br/revista/materia/id/421/n/pavimentacao_com_bagaco_d_e_cana)>. Acesso em: 04 mai. 2016.

LEAL, C. **Asfalto com Bagaço de Cana**. Pesquisa Fapesp. 2011. Disponível em: <[http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2011/03/064-065\\_LInProdBrasil\\_181.pdf?ef9d81](http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2011/03/064-065_LInProdBrasil_181.pdf?ef9d81)>. Acesso em: 04 mai. 2016.

LEAL, C.L.D. **Aproveitamento do Bagaço de Cana de Açúcar em Misturas Asfálticas**. 2013. 219f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

LEÃO, M. A. **Fibras de Licuri: Um reforço alternativo de compósitos poliméricos**. 2008. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

LEÃO, R. M. **Tratamento Superficial da Fibra de Coco e Aplicação em Materiais Compósitos como Reforço do Propileno**. 2012. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MOURÃO, F. A. L. **Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA**. 2003. 131f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

NAKAHARA, S. M. **Estudo do desempenho de reforços de pavimentos asfálticos em via urbana sujeita a tráfego comercial pesado**. 2005. 306f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NEVES FILHO, C. L. D. **Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas SMA Produzidas com Ligante Asfalto-Borracha**. 2004. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PAULA, G. P. **Formulação e Caracterização de Compósitos com Fibras Vegetais e Matriz Termoplástica**. 2011. 102f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goitacazes, Rio de Janeiro, 2011.

PASA V. F. **Análise do comportamento de estruturas de concreto armado reforçadas com fibras de aço via método dos elementos finitos**. 2007. 158f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PETROBRAS DISTRIBUIDORA S. A. **Ficha de informação de segurança de produto químico - FISPQ.** Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.br.com.br/wps/wcm/connect/b910518043a7b1ee91779fecc2d0136c/fispq-asf-cap50-70.pdf?MOD=AJPERES>>. Acesso em: 20 mai. 2015.

PINTO, S.; MOTTA, L. M. G. 1995. **Catálogo de Curvas de Fadiga.** Boletim Técnico Nº16, Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv. Rio de Janeiro, 1995.

PINTO, S.; PINTO, I. E. **Pavimentação Asfáltica.** 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

REIS, J. C. L. **Capim annoni 2: origem, morfologia, características, disseminação.** In: REUNIÃO REGIONAL DE AVALIAÇÃO DE PESQUISA COM ANNONI, 2., 1993, Bagé. Anais... Bagé: Embrapa-CPPSUL, 1993. p. 5-23.

RODRIGUES R. M. **Estudo do Trincamento dos Pavimentos.** 1991. 208f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

ROSA, C. C.; MOREIRA, D. D. C.; BILCATI, G. K. **Estudo das Propriedades Físicas da Fibra de Curauá.** 2012. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2012/artigos/104163.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

SANTOS, C. R. G. **Avaliação das Influências do Tipo de Ligante e do Volume de Vazios na Vida de Fadiga de Algumas Misturas Asfálticas.** 2005. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SARZALEJO, A. G. et al. **Manual técnico: fibras como elemento estrutural para reforço de concreto.** Maccaferri do Brasil Ltda., 2009. 247 p.

SILVA A. C. **Estudo da Durabilidade de Compósitos Reforçados com Fibras de Celulose.** 2002. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002

SINICESP. **O uso de fibras de celulose em pavimentação.** 2013. Disponível em: <<http://www.sinicesp.org.br/materias/2013/bt03a.htm>>. Acesso em: 30 mai. 2016.

SOBREIRA, G. **Terrastock – Banco de Imagens.** 1986. Disponível em: <<http://www.terrastock.com.br/default.asp?i=br&p=detalhes&cod=a1786>>. Acesso em: 30 maio. 2016.

SOUZA, T. R. **Geração de Energia Através da Palha e do Bagaço de Cana-de-açúcar**. 2012. 29 f. Monografia (Programa de Pós-graduação em Gestão de Produção Industrial Sucoenergética) – Universidade Federal de São Carlos, Piracicaba, 2012.

TOLEDO FILHO, R. D. **Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: Caraterização experimental**. 1997. 483f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

VALE, A. C. **Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do Tipo SMA**. 2007. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

VASCONCELOS, K. L. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias**. 2004. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.