

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JOSIELI BREITENBACH

**ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA
A TRAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS**

Alegrete

2016

JOSIELI BREITENBACH

**ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA
A TRAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS**

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
Co-orientador: Rodrigo André
Klamt

**Alegrete
2016**

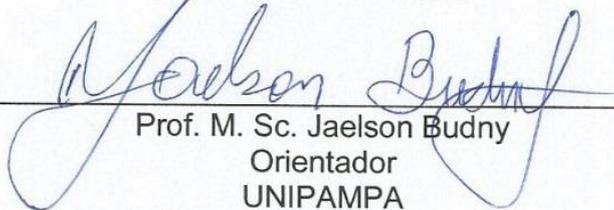
JOSIELI BREITENBACH

**ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA
A TRAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS**

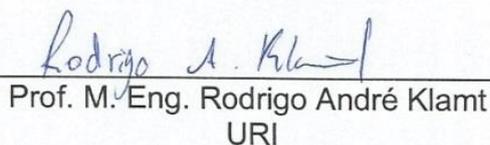
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 20 de junho de 2016.

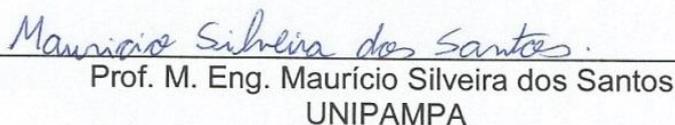
Banca examinadora:



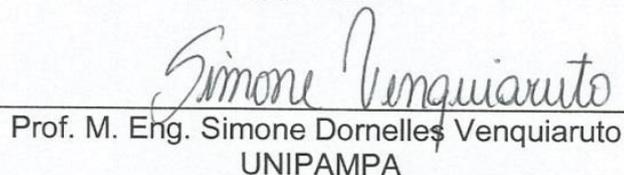
Prof. M. Sc. Jaelson Budny
Orientador
UNIPAMPA



Prof. M. Eng. Rodrigo André Klamt
URI



Prof. M. Eng. Maurício Silveira dos Santos
UNIPAMPA



Prof. M. Eng. Simone Dornelles Venquiaruto
UNIPAMPA

Dedico este trabalho a minha mãe,
o teu incentivo e amor alimentaram os
meus sonhos, obrigada por caminhar
sempre ao meu lado!

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por me dar força e coragem nos momentos mais difíceis. Aos familiares, amigos e colegas que me acompanharam nesta jornada, encorajando, torcendo e motivando.

Agradeço ao Professor e orientador Jaelson Budny pelo apoio, orientação e conhecimento para a realização deste trabalho.

Aos professores membros da banca avaliadora pelo conhecimento e orientações de forma a acrescentar e melhorar a pesquisa. Em especial ao Professor Rodrigo Klamt que me orientou no início deste trabalho.

A Universidade Federal do Pampa pela oportunidade e conhecimento. A todos os professores que ao longo destes anos transmitiram seu conhecimento e experiência, obrigada!

Agradeço aos técnicos dos laboratórios de solos e pavimentação e do laboratório de engenharia civil da Unipampa, pela disposição e auxílio ao longo do trabalho.

Aos laboratórios e técnicos da Universidade Federal de Santa Maria por permitirem a realização dos ensaios.

A Bianka Nora Dias, essencial para o desenvolvimento desta pesquisa, obrigada por abdicar do seu tempo para estar no laboratório comigo, pelo apoio, por tudo, obrigada!

Aos meus pais Lourdes e Pedro, irmãos Juliano e Jardel, vocês sempre foram exemplares na minha vida, são o meu rumo e a minha motivação, obrigada por me apoiarem e não medirem esforços para que este sonho se concretizasse!

E por fim agradeço ao meu namorado Helison, que caminhou ao meu lado alguns destes anos, com apoio, paciência, motivação e amor infinito. Obrigada por ter sido também meu revisor de textos!

RESUMO

Com a crescente degradação dos pavimentos combinado a investimentos modestos na ampliação e manutenção do modal rodoviário, novas tecnologias e materiais são avaliados para amenizar os defeitos ao longo do tempo. As fibras sintéticas de polipropileno têm sido utilizadas nas matrizes cimentícias e em reforço de solo com a finalidade de aumentar sua capacidade de suporte. Esta pesquisa propôs três adições de fibra de polipropileno na matriz da mistura asfáltica, com a finalidade de avaliar o comportamento mecânico, bem como comparar os resultados obtidos à pesquisa de Heck (2015) para uma mistura convencional e uma mistura com adição. Inicialmente, 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 obtidos na dosagem foram comparados à mistura convencional e a mistura com fibras de polipropileno de Heck (2015), bem como avaliados aos requisitos mínimos recomendados por normas. De acordo com os resultados, as três misturas propostas atendem aos requisitos normativos. Comparando a mistura convencional de Heck (2015), pode-se afirmar que a adição das fibras de polipropileno como material de reforço para pavimentos flexíveis é válida, pois suporta valores consideráveis de deformações em um período de tempo maior.

Palavras chave: fibras de polipropileno, mistura asfáltica, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

With the increasing of pavement deterioration and modest investments for expanding and maintenance of road system, new technologies and materials are evaluated to mitigate the flaws through time. Synthetic propylene fibers have been used in cementitious matrices and soil reinforcement with the aim of to increase its bearing capacity. This study proposes three polypropylene fiber additions to the matrix asphalt mix with the aim of evaluate the mechanical behavior and compare the results to Heck's (2015) research for a conventional mixture and a mixture containing added. Initially, the Marshall dosage was performed for volumetric characterization of mixtures, followed by two mechanical tests: geotechnical and resilient properties, and tensile strength by diametral compression. The results obtained with the dosage were compared to conventional mixing and to the Heck (2015) mixture with propylene fibers, as well evaluated by the minimum requirements recommended by standards. According to the results, all three proposals mixtures comply with the regulatory requirements. Compared to conventional Heck (2015) mixing, can be stated that the addition of polypropylene fibers as a reinforcing material for flexible pavements is valid, since it supports considerable amounts of deformation in a long period of time.

Keywords: polypropylene fibers, asphalt mix, mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção transversal da estrutura do pavimento	14
Figura 2 – Corte longitudinal de um pavimento concreto-cimento.....	15
Figura 3 – Corte longitudinal de um pavimento asfáltico	16
Figura 4 – Esforços em camadas do pavimento	16
Figura 5 – Mr e RT de misturas investigadas no país (25°C)	20
Figura 6 – Variação da serventia no tempo (desempenho do pavimento)	22
Figura 7 – Trinca isolada transversal	23
Figura 8 – Trinca interligada tipo jacaré	24
Figura 9 – Trinca interligada tipo bloco	24
Figura 10 – Afundamento de trilha de roda	25
Figura 11 – Ondulação.....	26
Figura 12 – Escorregamento.....	27
Figura 13 – Exsudação	27
Figura 14 – Desgaste	28
Figura 15 – Panela ou buraco	29
Figura 16 – Vantagens e desvantagens da utilização de fibras	31
Figura 17 – Sequência dos procedimentos metodológicos	33
Figura 18 – Composição da mistura.....	35
Figura 19 – Fibra de polipropileno de 24 e 12mm	37
Figura 20 – Sequência de moldagem das misturas	40
Figura 21 – Sequência final de compactação e desmolde	41
Figura 22 – Procedimento do ensaio de massa específica aparente	43
Figura 23 – Sequência para a determinação da massa específica máxima	45
Figura 24 – Sequência do ensaio de Módulo de Resiliência.....	48
Figura 25 – Sequência do ensaio de RT	49
Figura 26 – Esquema do ensaio de tração por compressão diametral	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diâmetros e denominações de pedras britadas	18
Tabela 2 – Composição dos agregados.....	34
Tabela 3 – Propriedades físico-químicas do CAP 50/70	36
Tabela 4 – Ensaio de viscosidade do CAP 50/70.....	36
Tabela 5 – Propriedades das fibras de polipropileno	38
Tabela 6 – Quantitativo dos corpos de prova.....	46
Tabela 7– Massa específica aparente (Gmb).....	51
Tabela 8 – Massa específica aparente (Gmb).....	51
Tabela 9 – Massa específica máxima (Gmm)	53
Tabela 10 – Massa específica máxima (Gmm)	53
Tabela 11 – Volume de vazios para 1% de 24mm	55
Tabela 12 – Volume de vazios para 1% de 12mm	56
Tabela 13 – Volume de vazios para 0,5% de 12mm	56
Tabela 14 – Módulo de Resiliência para adição de 1% de 24mm.....	59
Tabela 15 – Módulo de Resiliência para adição de 1% de 12mm.....	59
Tabela 16 – Módulo de Resiliência para adição de 0,5% de 12mm.....	60
Tabela 17 – RT para adição de 1% de 24mm	62
Tabela 18 – RT para adição de 1% de 12mm	63
Tabela 19 – RT para adição de 0,5% de 12mm	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica de trabalho, faixa C do DNIT	35
Gráfico 2 – Viscosidade do ligante asfáltico CAP 50/70.....	37
Gráfico 3 – Massa específica aparente (Gmb) da adição de 1% de 24mm	52
Gráfico 4 – Massa específica aparente (Gmb) da adição de 1% de 12mm	52
Gráfico 5 – Massa específica aparente (Gmb) da adição de 0,5% de 12mm	53
Gráfico 6 – Massa específica máxima (Gmm) da adição de 1% de 24mm	54
Gráfico 7 – Massa específica máxima (Gmm) da adição de 1% de 12mm	54
Gráfico 8 – Massa específica máxima (Gmm) da adição de 0,5% de 12mm	55
Gráfico 9 – Teor de ligante x Volume de vazios para adição de 1% de 24mm	56
Gráfico 10 – Teor de ligante x Volume de vazios para adição de 1% de 12mm	57
Gráfico 11 – Teor de ligante x Volume de vazios para adição de 0,5% de 12mm	57
Gráfico 12 – Módulo de resiliência para adição de 1% de 24mm.....	60
Gráfico 13 – Módulo de resiliência para adição de 1% de 12mm.....	61
Gráfico 14 – Módulo de resiliência para adição de 0,5% de 12mm.....	61
Gráfico 15 – RT para adição de 1% de 24mm	64
Gráfico 16 – RT para adição de 1% de 12mm	64
Gráfico 17 – RT para adição de 0,5% de 12mm	65
Gráfico 18 – RT x deformação da adição de 1% de 24mm.....	66
Gráfico 19 – RT x deformação da adição de 1% de 12mm.....	66
Gráfico 20 – RT x deformação da adição de 0,5% de 12mm.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – Association of State Highway and Transportation Officials

ADP – Asfalto diluído

AMB – Asfalto modificado por borracha

AMP – Asfalto modificado por polímeros

AR – Agentes rejuvenescedores

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CNT – Confederação Nacional do Transporte

CPA – Camada porosa de atrito

CP – Corpo de prova

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

EAP – Emulsão asfáltica

Gmb – Massa específica aparente

Gmm – Massa específica máxima

LVDT – Linear Variable Differential Transducer

Mr – Módulo de resiliência

RT – Resistência à tração por compressão diametral

SNV – Sistema Nacional de Viação

Vv – Volume de vazios

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	11
1.1.1 Objetivo geral	11
1.1.2 Objetivos específicos.....	11
1.2 Estrutura do trabalho	12
2 REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1 Estrutura do pavimento	13
2.2 Mistura asfáltica	17
2.2.1 Ligante.....	17
2.2.1.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)	17
2.2.2 Agregado.....	18
2.2.3 Propriedades das misturas asfálticas	18
2.2.3.1 Ensaio de módulo - módulo de resiliência.....	19
2.2.3.2 Ensaio de ruptura - resistência à tração por compressão diametral.....	19
2.3 Mecanismos de degradação dos pavimentos flexíveis	21
2.4 Patologias em misturas asfálticas de pavimentos flexíveis	22
2.4.1 Fenda.....	23
2.4.2 Afundamento	24
2.4.3 Ondulação ou corrugação	25
2.4.4 Escorregamento	26
2.4.5 Exsudação	27
2.4.6 Desgaste	28
2.4.7 Panela ou buraco	28
2.4.8 Remendo	29
2.5 Misturas asfálticas modificadas por fibras	29
2.5.1 Tipos de fibras.....	31
2.5.1.1 Fibras de polipropileno.....	31
3 METODOLOGIA	33
3.1 Materiais.....	33
3.1.1 Agregados.....	33
3.1.2 Ligante.....	36

3.1.2.1 Ensaio de viscosidade	36
3.1.3 Fibras	37
3.2 Métodos	38
3.2.1 Misturas	38
3.2.2 Dosagem Marshall	38
3.2.2.1 Massa específica aparente (Gmb)	42
3.2.2.2 Massa específica máxima (Gmm)	43
3.2.2.3 Volume de vazios x teor ótimo de ligante	45
3.2.3 Procedimentos metodológicos para a realização do estudo	46
3.2.4 Ensaio mecânicos	46
3.2.4.1 Ensaio módulo de resiliência	47
3.2.4.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	49
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	51
4.1 Caracterização volumétrica das misturas	51
4.2 Caracterização mecânica das misturas	58
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
ANEXOS	73
ANEXO A – RT x Deformação da mistura convencional	74
ANEXO B – RT x Deformação da mistura com fibras	75

1 INTRODUÇÃO

Segundo Bernucci et al. (2008), o asfalto é um dos materiais de construção mais antigos utilizado pelo homem, sendo no mundo, a principal forma de revestimento na pavimentação. O pavimento tem como principal função técnica e econômica resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e do clima, propiciando aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

No Brasil, aproximadamente 95% das rodovias são pavimentadas com revestimento asfáltico (BERNUCCI et al., 2008). Em 2014 a malha viária total contabilizada pelo Sistema Nacional de Viação (SNV) foi de 1.720.613,9km, englobando redes planejadas, pavimentadas e não pavimentadas, sendo que deste total apenas 213.192,4km (12%) eram pavimentadas e apenas 9% planejadas (DNIT, 2014).

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, revelando que cerca de 60% das rodovias estão classificadas como regulares, ruins ou péssimas. Considerando a avaliação apenas do pavimento, constatou-se que 49,9% estão em más condições de trafegabilidade (CNT, 2014).

Manter o bom estado das rodovias é fundamental para garantir o desenvolvimento econômico do país, a redução de acidentes e a sustentabilidade. Os investimentos modestos na ampliação e manutenção do modal são apresentados pelo CNT (2014) como um dos principais fatores de degradação do mesmo.

Devido à exposição ao clima e as cargas cíclicas, combinadas à falta de manutenção, o pavimento é uma estrutura predisposta a apresentar falhas. Cerca de 22,4% dos pavimentos apresentam alguma deficiência, 3,3% apresentam buracos, ondulações e afundamentos, 19,1% trincas na malha e remendos, e 44,7% apresentam desgaste (CNT, 2014).

Neste contexto, novas tecnologias e materiais são avaliados para amenizar os defeitos supracitados, conferindo ao pavimento segurança e maior vida útil. Entre estes materiais, as fibras sintéticas de polipropileno têm sido utilizadas em matrizes cimentícias e reforço para solo.

A adição de fibras de polipropileno na matriz de concreto tem alcançado resultados positivos na resistência mecânica à tração. A fibra é distribuída de forma homogênea formando uma micro-armadura, eficaz no combate a fissuração e elevando a resistência (SARZALEJO et al., 2009).

Trabalhos realizados indicam que a adição de fibras de polipropileno no pavimento asfáltico pode melhorar seu desempenho quanto à deformação permanente, ao trincamento por fadiga e a suscetibilidade das misturas à variação térmica (MELLO et al., 2008 apud SOUZA, 2010).

Desta forma, é fundamental a realização de pesquisas que avaliem a influência da adição de fibras de polipropileno 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

Analisar o efeito da adição de fibras de polipropileno em misturas de concreto asfáltico.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência da adição de fibras de polipropileno em diferentes teores (0,5% e 1%);
- avaliar diferentes comprimentos de fibras (12mm e 24mm);
- comparar resultados obtidos com resultados de misturas asfálticas convencionais e com adição de fibras já estudadas.

Para atingir os objetivos específicos foram realizados os ensaios de:

- Dosagem Marshall;
- módulo de resiliência;
- resistência a tração por compressão diametral.

1.2 Estrutura do trabalho

Para alcançar os objetivos propostos, este trabalho está dividido em cinco capítulos.

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

No segundo consta a fundamentação teórica, abordando temas como a estrutura do pavimento, misturas asfálticas e suas propriedades, mecanismos de degradação e patologias, bem como as misturas modificadas com fibras.

No terceiro é apresentada a metodologia proposta para a realização do trabalho.

No quarto são apresentadas as análises dos resultados e no quinto e último capítulo as considerações finais e sugestões para próximos trabalhos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são abordados tópicos como a estrutura do pavimento, suas camadas e a classificação dos tipos de pavimentos, os componentes das misturas asfálticas (ligante, agregado e as propriedades das misturas), os mecanismos de degradação e as patologias dos pavimentos flexíveis e ainda uma abordagem sobre misturas asfálticas modificadas por fibras.

2.1 Estrutura do pavimento

O histórico do pavimento remete ao histórico da própria humanidade, permitindo o desenvolvimento de cidades e regiões. Bernucci et al. (2008) define o pavimento como uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, tendo como função principal resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e do clima, que proporcione aos usuários conforto, segurança, economia e melhoria nas condições de rolamento.

Balbo (2007) define como sendo uma estrutura não perene formada por camadas sobrepostas compactadas de diferentes materiais, devendo ser adequada para atender estrutural e operacionalmente o tráfego, mantendo a durabilidade e um custo mínimo possível.

Cada camada do pavimento é dimensionada para receber e transmitir esforços de modo a aliviar pressões sobre as camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes. O pavimento é composto por camadas de base, sub-base, reforço do subleito e subleito e cada uma destas possuem uma ou mais funções específicas para proporcionar aos veículos boas condições de tráfego, sendo elas (BALBO, 2007):

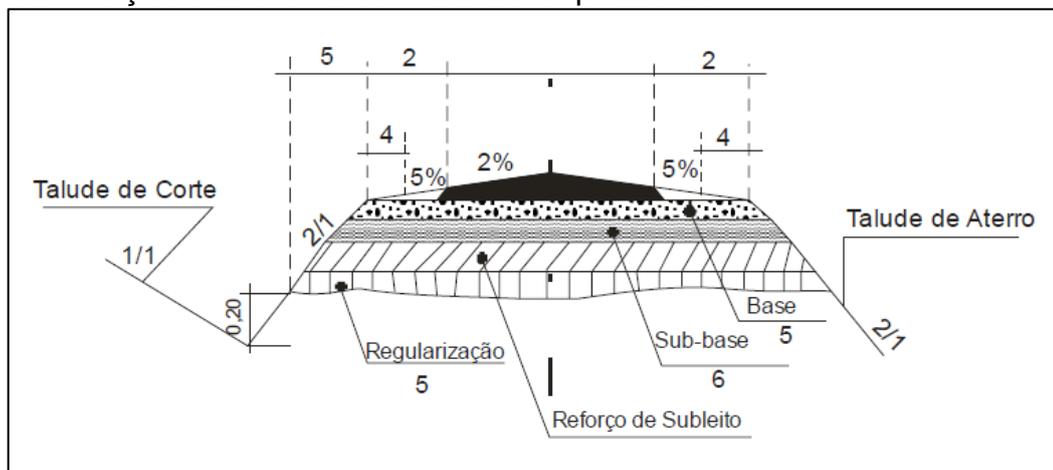
- Revestimentos: tem a função de receber as cargas estáticas ou dinâmicas sem sofrer grandes deformações plásticas ou elásticas, desagregação dos componentes ou perda da compactação. Para que seja eficiente, deve ser composto de materiais aglutinados ou dispostos de modo a evitar a movimentação horizontal;
- subleitos: os esforços impostos no subleito são aliviados em sua profundidade, dispersados normalmente no primeiro metro. Os materiais utilizados para subleitos devem ser consolidados e

compactados. As camadas superiores absorvem a maior parte dos esforços, portanto, deve-se ter maior preocupação com as mesmas;

- reforço de subleito: resiste maiores solicitações que o subleito, podendo ser dispensado onde houver camadas superiores de maior espessura. Para o reforço do subleito admite-se uma camada de solo de maior qualidade que a utilizada no subleito;
- bases e sub-bases: resistem grande parte dos esforços transmitidos pelo revestimento e podem ser divididas em duas camadas de base e sub-base, podendo contribuir para a drenagem subsuperficial do pavimento. Para as bases o material é constituído de solos estabilizados naturalmente, misturas de solos e agregados, brita graduada, entre outros. Para a sub-base pode-se utilizar os mesmos materiais da base.

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

Figura 1 – Seção transversal da estrutura do pavimento



Fonte: DNIT (2006a, p. 106)

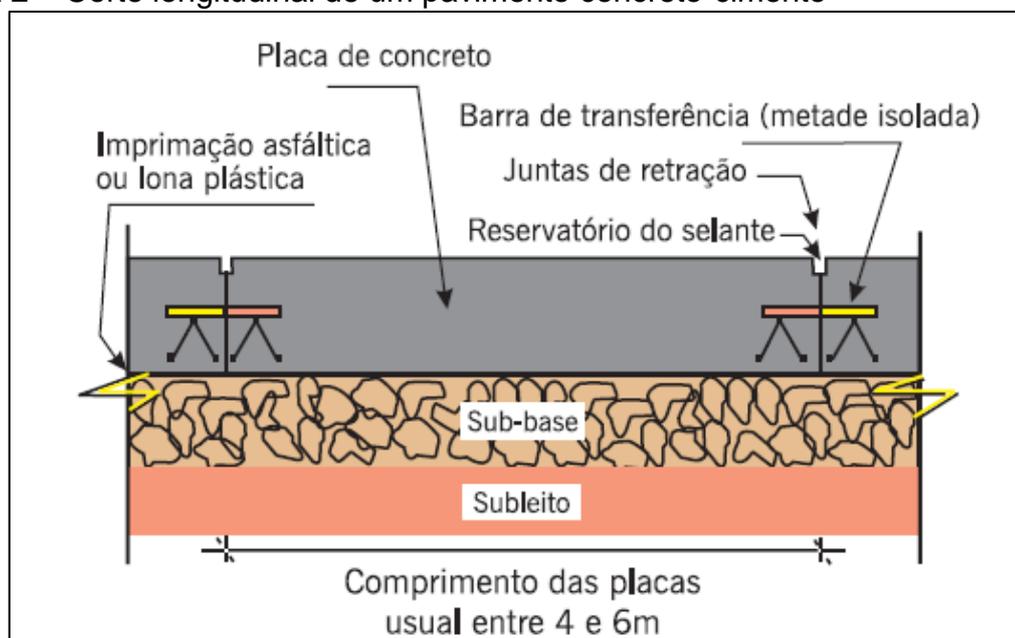
Os pavimentos podem ainda ser classificados como sendo rígidos ou flexíveis, e atualmente como pavimento de cimento Portland e pavimentos asfálticos, indicando o tipo de revestimento empregado (BERNUCCI et al., 2008).

Os pavimentos rígidos são pouco deformáveis e constituídos principalmente por concreto de cimento Portland. Estes tendem a romper por tração na flexão, quando sujeitos a deformações. Os pavimentos flexíveis caracterizam-se por sofrer deformações até certo limite sem romper, sendo dimensionados comumente a

compressão e a tração na flexão, provocado por deformações no pavimento, que levam a estrutura a deformações permanentes e ao rompimento por fadiga (SENÇO, 2007).

Bernucci et al. (2008) define o pavimento de concreto de cimento Portland como aquele em que o revestimento é uma placa de concreto, onde a espessura é fixada em relação a flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes. A placa de concreto pode ser armada ou não com barra de aço e a camada inferior à placa de cimento é designada como sub-base, devido à qualidade da mesma equivaler à sub-base de um revestimento asfáltico. A Figura 2 mostra o corte longitudinal típico de um pavimento de concreto de cimento asfáltico.

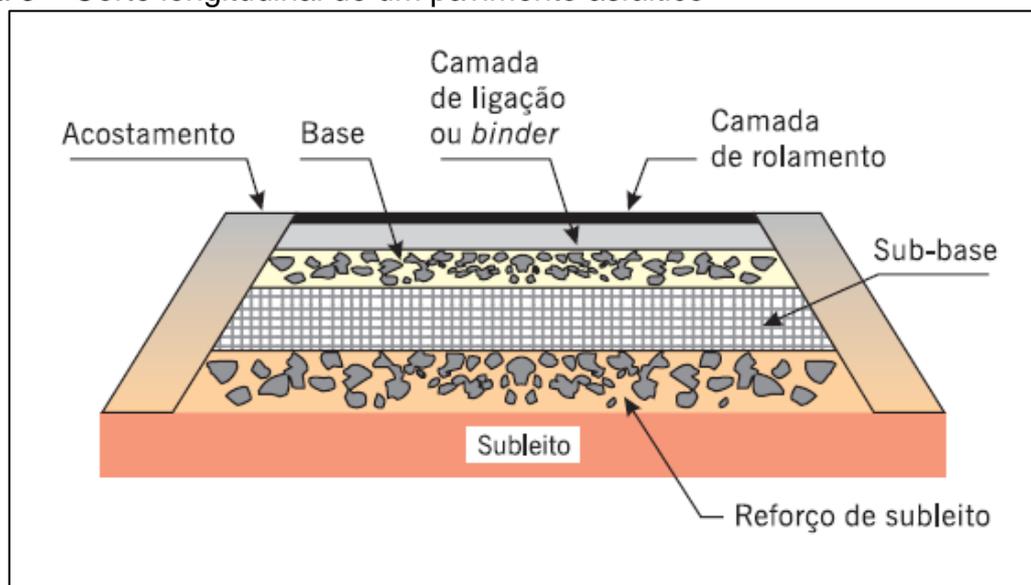
Figura 2 – Corte longitudinal de um pavimento concreto-cimento



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

Os pavimentos asfálticos são aqueles em que a camada de revestimento é constituída por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos. São formados por quatro camadas principais, revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. Dependendo da disponibilidade de material na região ou do tráfego, pode-se ter ausência de uma das camadas. A Figura 3 ilustra o corte longitudinal de um pavimento asfáltico (BERNUCCI et al., 2008).

Figura 3 – Corte longitudinal de um pavimento asfáltico

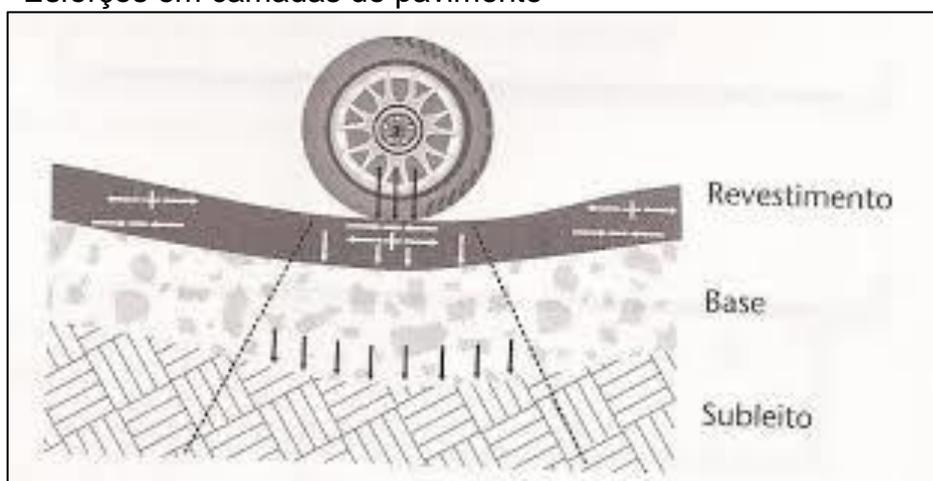


Fonte: Bernucci et al. (2008, p. 10)

A estrutura do pavimento segundo Balbo (2007) é concebida para, em seu sentido estrutural, receber e transmitir esforços de maneira a aliviar as pressões nas camadas inferiores, geralmente menos resistentes. Cada camada do pavimento possui uma função específica que deve garantir condições adequadas de suporte e rolamento aos veículos em qualquer condição climática.

Os veículos e o clima causam sob o pavimento a aplicação de cargas cíclicas, as quais acabam por gerar um estado de tensões na estrutura, que dependerá do comportamento mecânico de cada camada ou do conjunto delas (BALBO, 2007). A Figura 4 ilustra como as cargas são transmitidas para a camada do revestimento e como as mesmas se dissipam para as demais camadas.

Figura 4 – Esforços em camadas do pavimento



Fonte: Balbo (2007, p. 35)

2.2 Mistura asfáltica

2.2.1 Ligante

O asfalto ou ligante é um dos materiais mais antigos utilizados pelo homem na pavimentação. As principais razões para o intensivo uso deste material são: proporcionar forte união dos agregados; agir como um ligante que permite flexibilidade controlável; impermeabilizante; durável e resistente à ação de grande parte dos ácidos, álcalis e sais; e podem ser trabalhados em diversas temperaturas aquecido ou emulsionado (BERNUCCI et al., 2008; SENÇO, 2007).

O material asfáltico é definido como betume, asfalto ou alcatrão. O betume é uma mistura de hidrocarbonetos produzida naturalmente ou por combustão e solúvel no bissulfeto de carbono. O asfalto é uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação enquanto o alcatrão é um produto resultante do refino de alcatrões brutos, obtido da queima ou destilação do carvão ou madeira (BERNUCCI et al., 2008; SENÇO, 2007).

Os tipos de ligantes asfálticos existentes no mercado brasileiro são os cimentos asfálticos de petróleo (CAP), emulsões asfálticas (EAP), asfaltos diluídos (ADP), asfaltos oxidados de uso industrial, asfaltos modificados por polímeros (AMP) ou por borracha (AMB) e agentes rejuvenescedores (AR). O CAP serve de base de praticamente todos os outros produtos (BERNUCCI et al., 2008).

2.2.1.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

Segundo Balbo (2007) o CAP é obtido a partir de processos de refinamento do petróleo cru para a finalidade específica de pavimentação. Os CAP's possuem grandes quantidades de betume (hidrocarbonetos), viscosidade e agem como ligantes.

O CAP é semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico plástico em temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas, se enquadrando em limites de consistência para determinadas temperaturas estabelecidas mediante ensaios (BERNUCCI et al., 2008).

Na composição como ligante o CAP possui boa aderência aos agregados além de apresentar propriedades impermeabilizantes, flexibilidade, relativa

durabilidade e grande resistência a maior parte dos ácidos, álcalis e sais, sendo ainda insolúvel em água (BALBO, 2007).

2.2.2 Agregado

Balbo (2007) define os agregados como um conjunto de grãos minerais dentro de um determinado limite de dimensão, naturais ou artificiais que podem ser britados ou não. Para a finalidade de pavimentação devem atender requisitos como durabilidade, resistência e adesividade ao ligante.

Para a fabricação de misturas asfálticas os agregados são tratados em termos de faixas de determinados diâmetros, conforme indicado pela Tabela 1.

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)

Uma importante consideração quanto à forma dos agregados deve ser feita, podendo ser definidos em termos de esfericidade e angularidade. A forma cúbica ou esférica é conhecida por fornecer melhores propriedades aos concretos de mistura asfáltica melhorando a trabalhabilidade, pois sua superfície específica é menor que os agregados de forma irregular (BALBO, 2007).

2.2.3 Propriedades das misturas asfálticas

Segundo Bernucci et al. (2008), a caracterização dos materiais utilizados na mistura asfáltica é complexa em virtude das propriedades desses materiais dependerem de diversos fatores, como o meio ambiente, magnitude, tempo de aplicação e frequência das cargas dos veículos e estado de tensões. Ainda deve-se considerar o envelhecimento do ligante pela oxidação, o que aumenta a complexidade, pois é difícil simular esse fenômeno em laboratório.

Os resultados obtidos da análise estrutural dos pavimentos são comparados com valores pré-definidos, de modo a evitar os principais tipos de defeitos como trincas por fadiga e deformação permanente. Os principais ensaios mecânicos para a caracterização de misturas asfálticas são categorizados como: ensaios convencionais (estabilidade Marshall), ensaios de módulo (resiliência, módulo complexo), ensaios de ruptura (resistência à tração direta, compressão diametral, flexão), ensaios de deformação permanente (simulador de tráfego, compressão ou tração axial estática, compressão ou tração axial de carga repetida) e ensaios complementares (BERNUCCI et al., 2008).

2.2.3.1 Ensaio de módulo - módulo de resiliência

Segundo Bernucci et al., (2008), o termo resiliência é definido classicamente como sendo a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando as tensões aplicadas causadoras das deformações cessam. O ensaio no Brasil é normatizado pelo DNIT 135/2010 – ME e é realizado aplicando-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova que pode ser moldado no compactador Marshall.

As cargas aplicadas geram uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação. O deslocamento recuperável causado pela carga aplicada é medido na direção horizontal que corresponde à tensão gerada em uma dada temperatura. Os métodos de dosagem (Marshall ou Superpave) podem apresentar valores distintos para o módulo de resiliência, pois a estrutura do esqueleto mineral causado pelos diferentes métodos de compactação interfere nas propriedades mecânicas (BERNUCCI et al., 2008).

É válido ressaltar que ao longo do tempo com o envelhecimento do ligante o módulo de resiliência das misturas asfálticas varia, o ligante sofre um processo de enrijecimento aumentando a rigidez dos revestimentos (BERNUCCI et al., 2008).

2.2.3.2 Ensaio de ruptura - resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) é um método indireto para determinar a resistência à tração, devido à dificuldade de obter-se diretamente.

Duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão são aplicadas em uma amostra cilíndrica através de frisos metálicos, que geram ao longo do diâmetro tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro (BALBO, 2007; BERNUCCI et al., 2008).

De acordo com as normas que regem o ensaio, no Brasil pelo DNIT 136/2010 – ME, os cálculos que determinam a resistência à tração consideram que o corpo de prova rompe devido à tensão de tração uniforme gerada ao longo do diâmetro solicitado que se iguala a tensão máxima admissível do material, que está em regime elástico durante todo o ensaio (BERNUCCI et al., 2008).

A norma DNIT 031/2006-ES especifica o valor mínimo de RT para concretos asfálticos de 0,65MPa. Conforme a mistura asfáltica envelhece a RT aumenta, o que nem sempre representa vantagem, pois a resiliência também aumenta, perdendo assim a flexibilidade (BERNUCCI et al., 2008).

Bernucci et al. (2008) reuniu diversos resultados de ensaios de módulo de resiliência e resistência a tração por compressão diametral para diferentes misturas asfálticas, conforme a Figura 5.

Figura 5 – Mr e RT de misturas investigadas no país (25°C)

Características	Faixa (publicação)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
Concreto asfáltico – CAP 30/45	Faixa C (Soares et al., 2000)	3.628	1,09	3.346
Concreto asfáltico – CAP 50/60		3.033	0,89	3.425
Concreto asfáltico – CAP 85/100		1.488	0,44	3.376
Concreto asfáltico – CAP 30/45	Faixa B (Soares et al., 2000)	5.105	0,82	6.201
Concreto asfáltico – CAP 50/60		4.425	0,73	6.062
Concreto asfáltico – CAP 85/100		1.654	0,21	7.755
Misturas densas (moldadas em usina)	Faixa C (Rede Asfalto, 2005)			
Concreto asfáltico 1		2.651	0,85	3.119
Concreto asfáltico 2		2.297	0,67	3.428
AAUQ1		1.825	0,52	3.510
AAUQ2		1.683	0,72	2.338
Misturas densas (moldadas em laboratório)	Faixa C (Rede Asfalto, 2005)			
Concreto asfáltico 1		3.609	1,26	2.864
Concreto asfáltico 2		3.026	1,23	2.460
AAUQ1		1.786	1,02	1.751
AAUQ2		1.682	0,81	2.077
SMA – 12,5mm	(Vasconcelos, 2004)	4.747	0,98	4.844
SMA – 9,5mm		3.367	0,82	4.106
Concreto asfáltico de referência	Faixa C (Lima, 2003)			
Com 0% fresado		3.200	1,20	2.667
Com 10% fresado		4.776	1,30	3.674
Com 30% fresado		7.524	1,30	5.787
Com 50% fresado	8.901	1,60	5.663	
Concreto asfáltico de referência	Faixa C (Pinheiro, 2004)	3.647	0,97	3.760
Asfalto-borracha (úmido)		2.393	0,50	4.786
Agregado-borracha (seco)		2.452	0,80	3.065

Fonte: Bernucci et al. (2008, p.302)

2.3 Mecanismos de degradação dos pavimentos flexíveis

A exposição contínua dos materiais de misturas asfálticas ao clima, produtos químicos e a ação das cargas faz com que a degradação seja inevitável, ou seja, as propriedades que contribuem para a resistência e a estabilidade do pavimento alteram-se, piorando gradativamente (BALBO, 2007).

Segundo Branco et al. (2008) o processo de evolução das degradações apoia-se no princípio da cadeia de conseqüências, onde uma degradação não evolui isoladamente no tempo, antes, dá origem a novos tipos e assim gera um ciclo de interferência mútua.

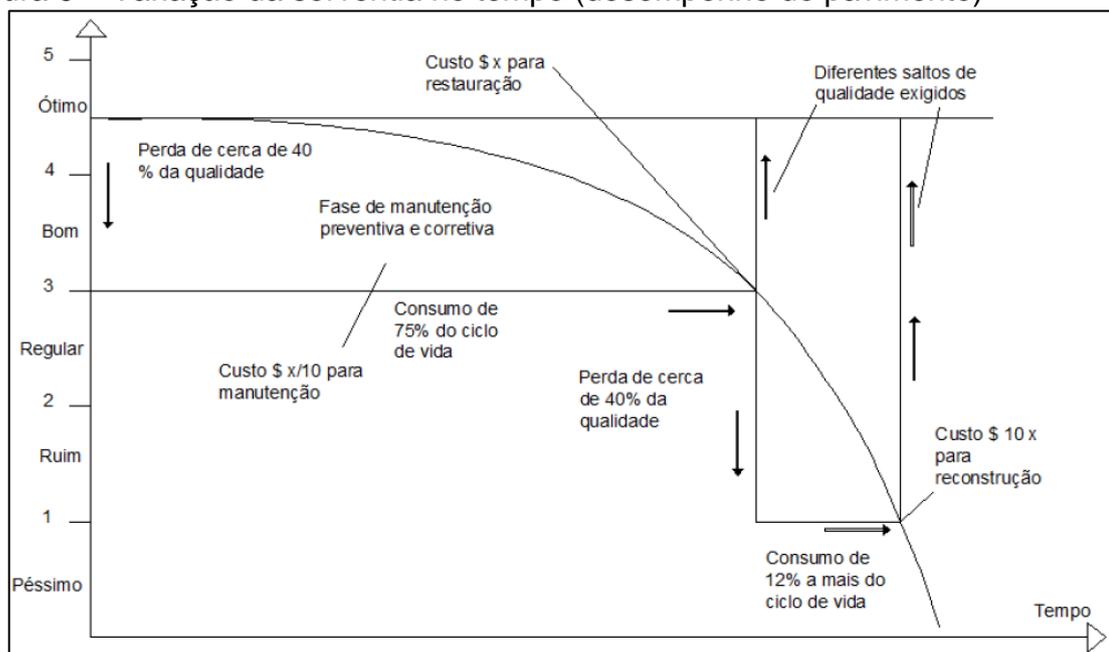
Branco et al. (2008) considera para o processo de degradação dos pavimentos fatores ativos e passivos, onde os fatores passivos são os que englobam as características do pavimento construído, como a espessura das camadas, os materiais utilizados e a qualidade da construção, e os fatores ativos são os principais responsáveis pelo processo de degradação, envolvendo as ações do tráfego e dos agentes climáticos. Além destes dois fatores deve-se considerar a fiabilidade da modelação dos pavimentos nos métodos de dimensionamento, constituindo mais um fator de incerteza no comportamento do pavimento.

O tráfego atuante e a estrutura do pavimento estão relacionados às deformações permanentes excessivas e fissuras de fadiga, enquanto a retração térmica e desagregação estão relacionadas às características dos materiais utilizados e as condições climáticas (SPECHELT, 2004).

O grau com que o pavimento atende os requisitos de conforto ao rolamento e segurança nas condições operacionais da via em um determinado momento de sua vida é chamado serventia, e o decréscimo da serventia ao longo do tempo é conhecido como desempenho (NAKAHARA, 2005).

O guia para projetos de estruturas de pavimentos publicado pela American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) em 1993 adotou o critério de ruptura por serventia para definir as equações de desempenho de pavimentos. A qualidade do rolamento é avaliada em uma escala de zero a cinco em relação ao tempo decorrido ou tráfego acumulado, conforme a Figura 6 (BALBO, 2007).

Figura 6 – Variação da serventia no tempo (desempenho do pavimento)



Fonte: Balbo (2007, p. 259)

Quanto maior a degradação do pavimento o aumento dos custos cresce de forma exponencial. Na ausência de manutenção o pavimento vai se degradar de forma tão intensa que será necessário sua reconstrução parcial ou total em um curto período de tempo.

2.4 Patologias em misturas asfálticas de pavimentos flexíveis

A terminologia do DNIT 005/2003 define os termos técnicos empregados em defeitos que ocorrem nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos ao longo do tempo, classificados como:

- Fenda;
- afundamento;
- ondulação ou corrugação;
- escorregamento;
- exsudação;
- desgaste;
- panela ou buraco;
- remendo.

2.4.1 Fenda

Fendas são descontinuidades na superfície do pavimento que conduzem a aberturas de maior ou menor porte apresentando-se em forma de fissuras ou trincas (DNIT, 2003). As fendas são causadas pelo tráfego atuante que promove tração nas fibras interiores do revestimento, e também pela alternância da temperatura que causa contrações de revestimento e a reflexão no revestimento de trincas existentes (DNIT, 2006b).

As fissuras são descontinuidades existentes no revestimento posicionadas longitudinal, transversal ou oblíqua ao eixo da via e é perceptível a distância inferior a 1,5m, enquanto as trincas são facilmente visíveis, com abertura superior a da fissura podendo apresentar-se sob a forma de trinca isolada (transversais, longitudinais e retração) ou trinca interligada (couro de jacaré e trinca tipo bloco) (DNIT, 2003; SILVA, 2008).

As Figuras 7, 8 e 9 apresentam as formas mais comuns de trincas nos pavimentos flexíveis.

Figura 7 – Trinca isolada transversal



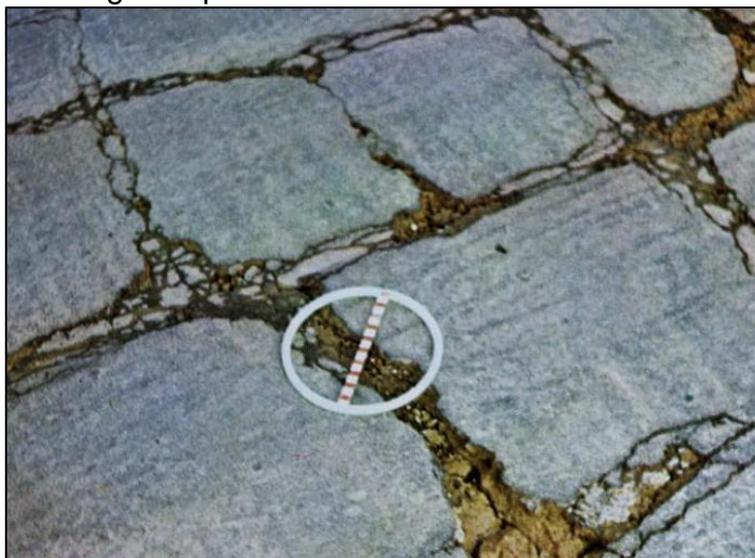
Fonte: DNIT (2003, p. 6)

Figura 8 – Trinca interligada tipo jacaré



Fonte: DNIT (2003, p. 7)

Figura 9 – Trinca interligada tipo bloco



Fonte: DNIT (2003, p. 7)

2.4.2 Afundamento

Os afundamentos são deformações plásticas ou permanentes caracterizados por depressões da superfície do pavimento podendo apresentar-se sob a forma de afundamento plástico ou de consolidação. A ação repetida da passagem da roda dos pneus e o fluxo canalizado dos veículos causam essas deformações (DNIT, 2006b; SILVA, 2008).

O afundamento plástico é causado pela fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito, acompanhado de solevamento enquanto o

afundamento de consolidação é causado pela consolidação diferencial de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito, sem estar acompanhado de levantamento (DNIT, 2003; SILVA, 2008).

A Figura 10 apresenta a forma típica de um afundamento plástico.

Figura 10 – Afundamento de trilha de roda



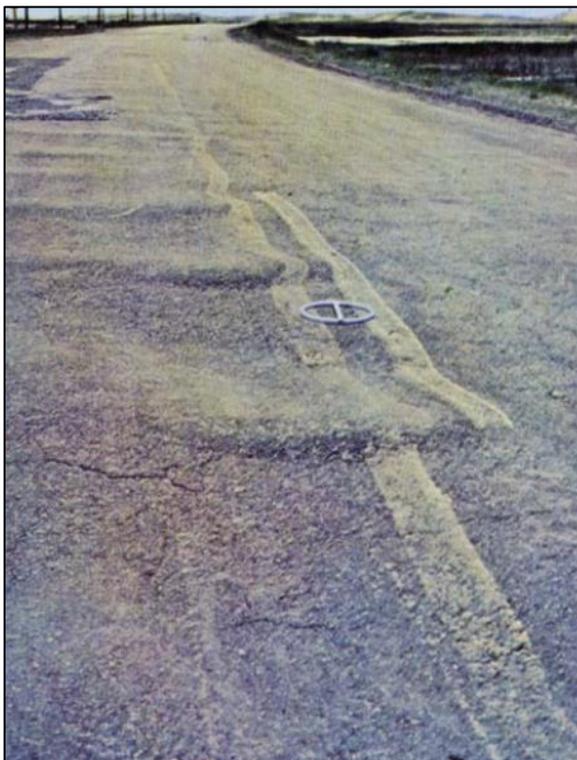
Fonte: DNIT (2003, p. 8)

2.4.3 Ondulação ou corrugação

A ondulação ou corrugação é uma falha caracterizada por ondulações transversais, de caráter plástico permanente no revestimento asfáltico. São causadas por instabilidade da mistura asfáltica, excesso de umidade das camadas subjacentes, contaminação da mistura asfáltica por materiais estranhos e retenção de água na mistura asfáltica (DNIT, 2006b).

As corrugações estão associadas à ruptura pelas tensões cisalhantes horizontais causadas pelos veículos em áreas submetidas à aceleração ou frenagem, comuns em subidas, rampas, curvas e intersecções (SILVA, 2008). A Figura 11 apresenta esta deterioração.

Figura 11 – Ondulação



Fonte: DNIT (2003, p. 9)

2.4.4 Escorregamento

O escorregamento é o deslocamento do revestimento em relação à camada subjacente do pavimento, com o aparecimento de fendas em forma de meia-lua. Essas fendas são causadas devido à falta de aderência entre a camada de revestimento e a camada subjacente, ou a baixa resistência da massa asfáltica (DNIT, 2003; SILVA, 2008). Na Figura 12 é possível visualizar este tipo de deterioração do pavimento.

Figura 12 – Escorregamento



Fonte: DNIT (2003, p. 9)

2.4.5 Exsudação

A exsudação é causada pelo excesso de ligante asfáltico na superfície do pavimento, causado pela migração do ligante através do revestimento (DNIT, 2003). Em altas temperaturas o asfalto dilata e não havendo espaço para ele ocupar, devido a um baixo volume de vazios ou excesso de ligante, o mesmo exsudará pelo revestimento, conforme a Figura 13 (SILVA, 2008).

Figura 13 – Exsudação



Fonte: DNIT (2003, p. 9)

2.4.6 Desgaste

O desgaste é a perda de agregados e/ou argamassa fina do revestimento asfáltico. É caracterizado por apresentar aspereza superficial anormal, com perda do envolvimento betuminoso e arrancamento progressivo dos agregados. As principais causas do desgaste são a redução da ligação e a perda da coesão entre agregado e ligante, execução da obra em condições meteorológicas desfavoráveis, presença de água no interior do revestimento e deficiência localizada de ligante asfáltico (DNIT, 2006b). A Figura 14 exemplifica o desgaste no revestimento asfáltico.

Figura 14 – Desgaste



Fonte: DNIT (2003, p. 11)

2.4.7 Panela ou buraco

Panela ou buraco são cavidades que se formam no revestimento devido a causas como a falta de aderência entre as camadas superpostas, causando o deslocamento das camadas. Essas cavidades podem alcançar as camadas inferiores do pavimento causando a desagregação das mesmas, conforme ilustrado pela Figura 15 (DNIT, 2003).

Figura 15 – Panela ou buraco



Fonte: DNIT (2003, p. 11)

2.4.8 Remendo

Os remendos são partes do revestimento onde o material original foi removido e substituído por outro similar ou diferente. São considerados falhas uma vez que refletem o mau comportamento da estrutura original. Os remendos são configurados como defeito quando provocam desconfortos causados pela solicitação intensa do tráfego, emprego de material de má qualidade, agressividade nas condições ambientais e problemas construtivos (DNIT, 2006b).

2.5 Misturas asfálticas modificadas por fibras

Desde o princípio da humanidade os povos vêm adicionando diferentes tipos de fibras em materiais de construção (solo, concreto e asfalto) para aumentar as suas propriedades. No antigo Egito colocava-se palha em argilas para a fabricação de tijolos conseguindo-se, assim, maior resistência à flexão. Outro exemplo histórico era a adição de crina de cavalo ou palha em revestimentos de construções mais pobres para evitar fissuras de retração (SARZALEJO et al., 2009).

A comercialização e a orientação científica quanto à tecnologia de fibras é muito mais recente. Segundo Sarzalejo et al., (2008) as adições de fibras de aço ou de vidro no concreto datam dos anos 50 enquanto os primeiros estudos científicos sobre concretos reforçados com fibras sintéticas surgem nos anos 60. Na pavimentação, somente nos últimos 30 anos iniciou-se a utilização de fibras.

Para Souza (2010) a popularização e o avanço de fibras nacionalmente e internacionalmente possibilitou o avanço em pesquisas, principalmente, em duas áreas da engenharia: na geotecnia com estudos de reforço de solos de fundações e de camadas de pavimentação; e em estruturas com a adição de fibras em concretos de cimento Portland.

Muitos trabalhos científicos relacionados à utilização de fibras têm sido desenvolvidos, dentre eles alguns se destacam, Homem (2002) avaliou o comportamento mecânico de um concreto asfáltico poroso com teores de asfalto modificado e adição de fibra de vidro em um teor de 0% a 1%. Através de ensaios mecânicos constatou-se que o acréscimo de fibras contribuiu positivamente em relação ao módulo de resiliência, com o aumento da temperatura. A interação asfalto-fibra diminuiu a permeabilidade e a deformação permanente foi mínima para um teor de fibra de 0,4% e de asfalto 4,5%.

Souza (2010) avaliou a influência de uma composição de fibras de polipropileno e aramida incorporadas a um ligante CAP 50/70. Utilizaram-se diferentes teores de fibras (0% a 3%) onde se constatou uma melhora na maioria dos parâmetros físicos do ligante com o aumento do teor de fibra. Para avaliar o efeito das fibras nas propriedades mecânicas da mistura foi utilizado o tipo CPA (camada porosa de atrito) e um teor de fibra de 0,05% do peso total da mistura. Os resultados para os corpos de prova com adição de fibras tiveram aumento na resistência a tração, módulo de resiliência e maior vida de fadiga, entretanto apresentaram maior desgaste cântabro e deformações permanentes mais elevadas.

Tanesi; Figueiredo (1999) incorporaram fibras de polipropileno como reforço de matriz de argamassa de concreto com o objetivo de controlar a fissuração por retração em pavimentos industriais. Constatou-se que a adição em baixos teores (0,1% em volume) apresentou melhora no comportamento do concreto em relação às solicitações dinâmicas, reduzindo a área de fissuras associadas à retração, embora não houve aumento na resistência mecânica.

Casagrande (2001) estudou o comportamento mecânico de um solo residual areno-siltoso reforçado com a adição de fibra de polipropileno distribuído aleatoriamente na massa do solo para assentamento de fundações superficiais. Os resultados apresentados demonstraram um aumento significativo da capacidade de suporte do solo com inclusão de fibras em relação ao solo sem a adição, além de

uma redução considerável dos recalques, quando comparado ao comportamento do solo residual compactado.

2.5.1 Tipos de fibras

Diversos tipos de fibras têm sido utilizadas em misturas asfálticas, entre elas as naturais, como de celulose e abastetos, as industrializadas sintéticas de poliéster, polietileno, polipropileno e acrílico e as industrializadas metálicas de aço, vidro e mineral (HOMEM, 2002).

A Figura 16 apresenta os principais tipos de fibras utilizados em misturas asfálticas e suas vantagens e desvantagens:

Figura 16 – Vantagens e desvantagens da utilização de fibras

<i>Fibra</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Asbestos	Alta capacidade de ligar-se ao asfalto Durabilidade Possível melhora de resistência a deformações permanentes	Nocivo à saúde
Celulose	Alta capacidade de ligar-se ao asfalto	Suscetível à umidade Pouco ou nenhum efeito de reforço
Mineral	Alta capacidade de ligar-se ao asfalto	Pouco ou nenhum efeito de reforço
Vidro	Atua como reforço Possível melhora de resistência da mistura	Fragilidade Baixa capacidade de aderência ao asfalto sem a utilização de tratamento superficial
Sintéticas >Poliéster >Polipropileno >Acrílica	Atua como reforço Possível melhora de resistência da mistura	Baixa capacidade de aderência ao asfalto
Aço	Atua como reforço Possível melhora de resistência da mistura	Nenhuma capacidade de aderência ao asfalto Ferrugem Problemas de compactação e de característica da superfície

Fonte: PIARC (1998, apud SOUZA, 2010, p. 29)

2.5.1.1 Fibras de polipropileno

As fibras de polipropileno são constituídas de um material polimérico chamado termoplástico. São abundantes e de baixo custo, possuem alta resistência a produtos químicos e umidade, bem como boas propriedades mecânicas. Os

polímeros termoplásticos são constituídos de longas cadeias de moléculas polimerizadas, estas cadeias são separadas e podem deslizar umas sobre as outras (HOLLAWAY, 1994 apud SOUZA, 2010).

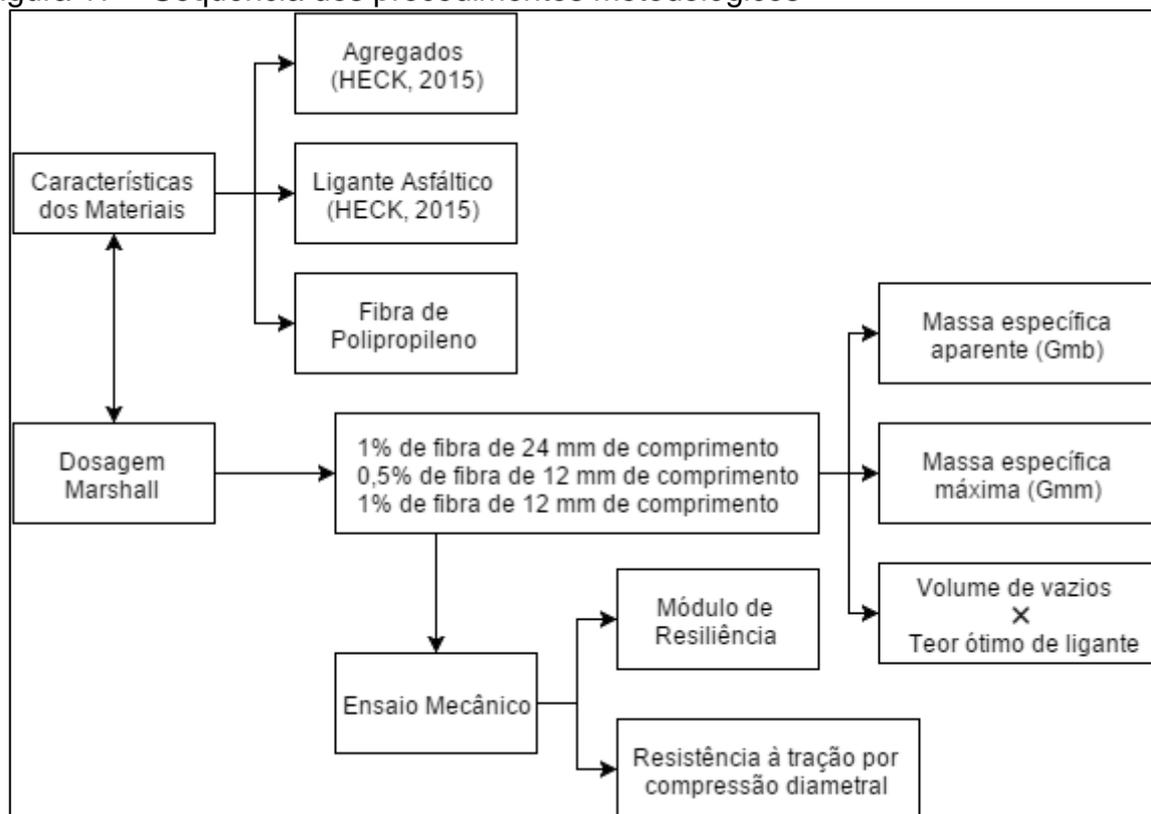
A característica de deslizar umas sobre as outras explica a flexibilidade e tenacidade das fibras de polipropileno, concedendo um grande aumento na resistência ao impacto aos materiais que é incorporada. O módulo de elasticidade geralmente é menor do que qualquer outra fibra, aproximadamente 8 GPa e a resistência a tração é de aproximadamente 400 MPa (TAYLOR, 1994 apud HOMEM, 2002).

Algumas literaturas como Homem (2002) afirmam que as fibras de polipropileno em misturas asfálticas são raras, devido à fibra possuir baixa resistência a temperaturas elevadas, porém o uso crescente deste material como modificante de asfalto (como realizado por Souza, 2010) ou reforço de misturas asfálticas pré-misturadas a frio tem tornado possível sua utilização. Os resultados obtidos tem se mostrado promissores no controle a fissuração, no melhoramento do desempenho quanto à deformação permanente e ao trincamento por fadiga.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os materiais e os métodos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. A Figura 17 mostra o esquema simplificado das atividades que foram realizadas.

Figura 17 – Sequência dos procedimentos metodológicos



Fonte: Elaboração própria

3.1 Materiais

Os materiais necessários para a realização da pesquisa são agregados (brita 1, brita 0 e pó de pedra), ligante asfáltico (CAP 50/70) e as fibras de polipropileno adicionadas a mistura.

3.1.1 Agregados

Os agregados utilizados neste trabalho são oriundos de doação da pedreira Pedra Rosada, situada próxima a BR-290 em Alegrete, RS. A classificação granulométrica dos mesmos foi realizado por Heck (2015), conforme a norma DNER-

ME 083/98 de Análises Granulométricas. Foram ensaiados brita 1, brita 0 e pó de pedra após 24h em estufa a 100°C.

Os materiais ensaiados tentaram ser enquadrados dentro das faixas B ou C do DNIT, porém, os mesmos apresentaram deficiência na quantidade de finos, sendo necessário separá-los em peneiras para que o excesso de alguns fosse desprezado. A Tabela 2 apresenta os valores das composições utilizadas e a porcentagem na mistura.

Tabela 2 – Composição dos agregados

Abertura (mm)	Nº	Cada dosagem (g)	Porcentagem na mistura (%)
25	1"	-	-
19	3/4"	-	-
12,5	1/2"	325	5
9,5	3/8"	650	10
4,75	4	3250	50
2	10	1040	16
0,42	40	422,5	6,5
0,18	80	292,5	4,5
0,075	200	227,5	3,5
Fundo	-	195	3
Cal	-	97,5	1,5

Fonte: Elaboração própria

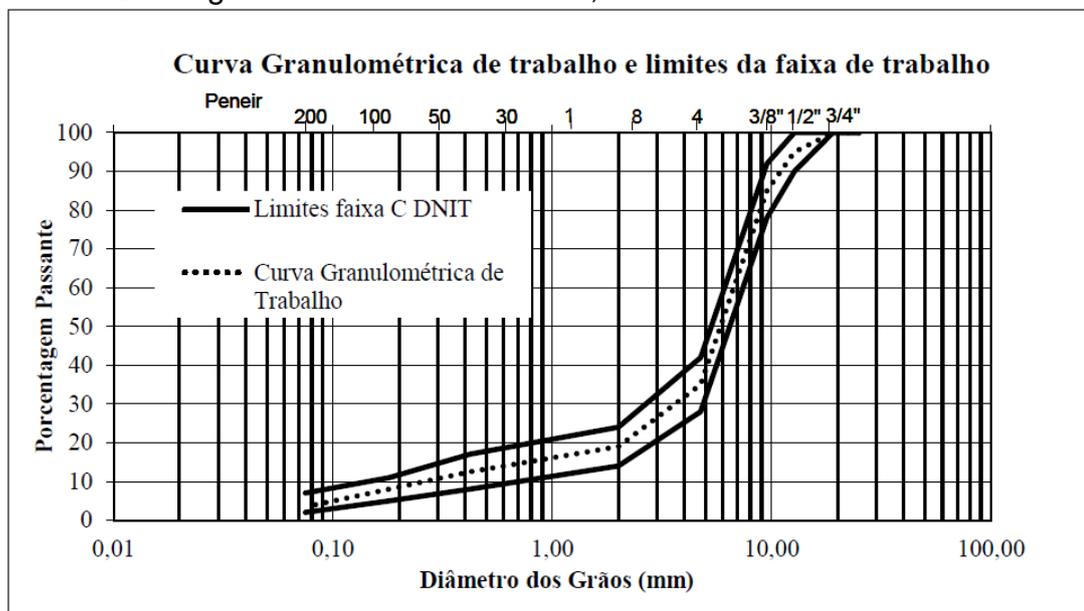
Devido à deficiência de finos e para facilitar o enquadramento nas faixas granulométricas do DNIT, adicionou-se 1,5% de cal hidratada CH-II de origem dolomítica. A composição da mistura pode ser analisada conforme a Figura 18. O Gráfico 1 apresenta a curva granulométrica de trabalho, enquadrado na faixa C do DNIT.

Figura 18 – Composição da mistura



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 1 – Curva granulométrica de trabalho, faixa C do DNIT



Fonte: Heck (2015, p. 46)

3.1.2 Ligante

O ligante utilizado foi o CAP 50/70 da Petrobras. As propriedades físico-químicas do ligante seguem conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades físico-químicas do CAP 50/70

Ponto de fusão/congelamento	48°C
Ponto de ebulição	> 450°C
Ponto de fulgor	235°C (vaso fechado)
Densidade	1,00 - 1,18 (água a 4°C=1)

Fonte: Adaptado de Petrobras (2014, não paginado)

3.1.2.1 Ensaio de viscosidade

O ensaio de viscosidade dos ligantes asfálticos é normatizado no Brasil pela DNER-ME 004/94 pelo viscosímetro Saybolt-Furol, sendo a viscosidade uma medida da consistência do cimento asfáltico por resistência ao escoamento (BERNUCCI et al., 2008).

Este ensaio foi realizado no laboratório da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) no viscosímetro Brookfield que permite medir as propriedades de consistência relacionadas ao bombeamento e a estocagem, permitindo ainda obter o gráfico de temperatura-viscosidade para a mistura asfáltica.

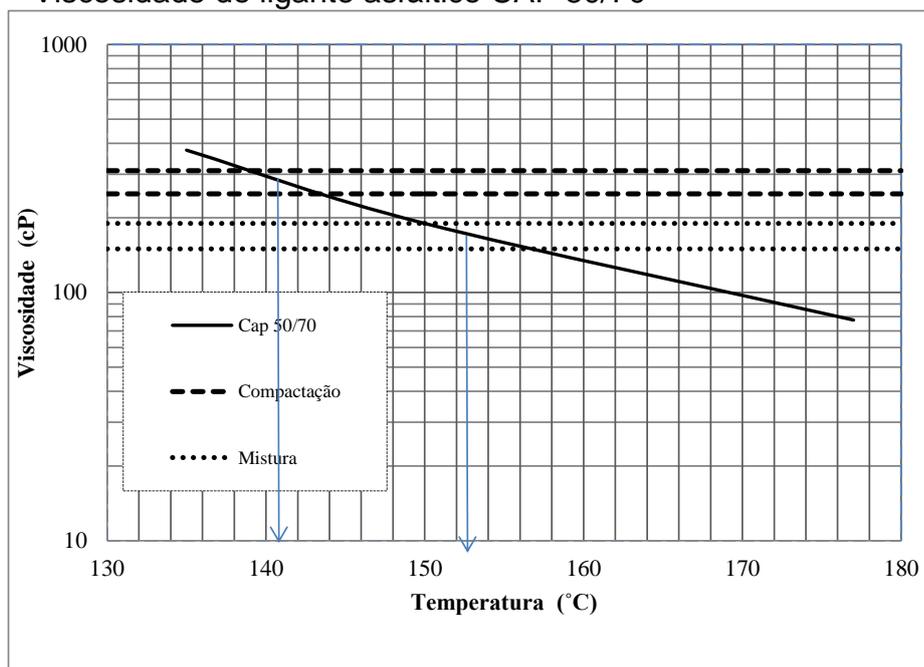
Os valores obtidos do ensaio são apresentados pela Tabela 4 e pelo Gráfico 2.

Tabela 4 – Ensaio de viscosidade do CAP 50/70

	Viscosidade (cp)			Mistura	Compactação
	375	190	77,5		
Temperatura (°C)	135	150	177	153-154	141-142

Fonte: Heck (2015, p. 47)

Gráfico 2 – Viscosidade do ligante asfáltico CAP 50/70



Fonte: Heck (2015, p. 48)

3.1.3 Fibras

Para a adição na mistura asfáltica utilizou-se fibra de polipropileno de origem sintética, comercializada pela Maccaferri do Brasil Ltda, possuindo comprimentos de 24 e 12mm e diâmetro de 18 μ m, conforme a Figura 19.

Figura 19 – Fibra de polipropileno de 24 e 12mm



Fonte: Elaboração própria

As propriedades de densidade, módulo de elasticidade e resistência à tração das fibras de polipropileno para os comprimentos de 24 e 12mm são apresentadas conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades das fibras de polipropileno

Fibra	Diâmetro (µm)	Densidade (Kg/m ³)	Módulo de elasticidade (kN/mm ²)	Resistência à tração (kN/mm ²)	Alongamento na ruptura (%)
Polipropileno	20 - 200	900	5 - 7	0,5 - 0,75	8

Fonte: Adaptado de Sarzalejo (2009, p. 14)

3.2 Métodos

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

3.2.1 Misturas

Por não haver um comprimento e nem uma porcentagem de adição ideal recomendado em estudos já realizados, adotou-se nesta pesquisa três adições para análise:

- Adição de 1% de fibra de 24mm de comprimento;
- adição de 1% de fibra de 12mm de comprimento;
- adição de 0,5% de fibra de 12mm de comprimento.

A adição de 0,5% é comumente utilizada em estruturas de concreto convencional. E, além das misturas que foram realizadas, os resultados obtidos por Heck (2015) para adição de 0,5% de fibra de 24mm de comprimento e para uma mistura convencional serviram como parâmetro comparativo.

3.2.2 Dosagem Marshall

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

O mais utilizado método de ensaio é o Marshall, que utiliza a compactação por impacto, e é normatizada no Brasil pela DNER-ME 043/95.

O método de dosagem Marshall consiste em moldar três corpos de prova para cada teor de ligante. Neste caso, foram moldados para as adições de 1% para os comprimentos de 24 cinco teores de ligante, para a adição de 1% e 0,5% de 12mm, quatro teores de ligante, conforme o item 3.2.1.

A fibra de polipropileno foi desfiada e adicionada após uma mistura prévia dos agregados com o ligante. Após, as misturas foram colocadas na estufa para simular o envelhecimento do ligante por 2h e moldadas nos corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100mm de diâmetro e 63,5mm de altura. A compactação foi realizada com 75 golpes de cada lado, após, os CP's foram armazenadas ao ar livre para a desmoldagem.

Para a adição com maior quantidade e comprimento de fibras (adição de 1% de 24mm), verificou-se uma grande dificuldade na homogeneização da mistura. A perda da temperatura durante a mistura dificultava o envolvimento do ligante nas fibras. O comprimento de 24mm causava uma espécie de “embolotamento”, as fibras se juntavam e tornavam a mistura difícil de ser realizada.

Nas misturas com comprimento inferior (12mm) obteve-se um resultado melhor de mistura, onde toda a fibra de polipropileno era envolvida pelo ligante, sendo a adição de 0,5% de 12mm a que demonstrou melhor resultado e maior facilidade na mistura.

As Figuras 20 e 21 ilustram a sequência de moldagem que se repetiu para as três misturas definidas na pesquisa.

Figura 20 – Sequência de moldagem das misturas



Fonte: Elaboração própria

Figura 21 – Sequência final de compactação e desmolde



Fonte: Elaboração própria

Para obter os parâmetros de dosagem os corpos de prova foram medidos com paquímetro digital, sendo realizadas três leituras no comprimento e na altura. O valor final foi a média das três leituras.

3.2.2.1 Massa específica aparente (G_{mb})

A massa específica aparente foi obtida a partir dos corpos de prova da mistura asfáltica compactada, dada pela Equação 1.

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_{sss} - M_{sss\ sub}} * 0,9971 \quad (1)$$

Onde:

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

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

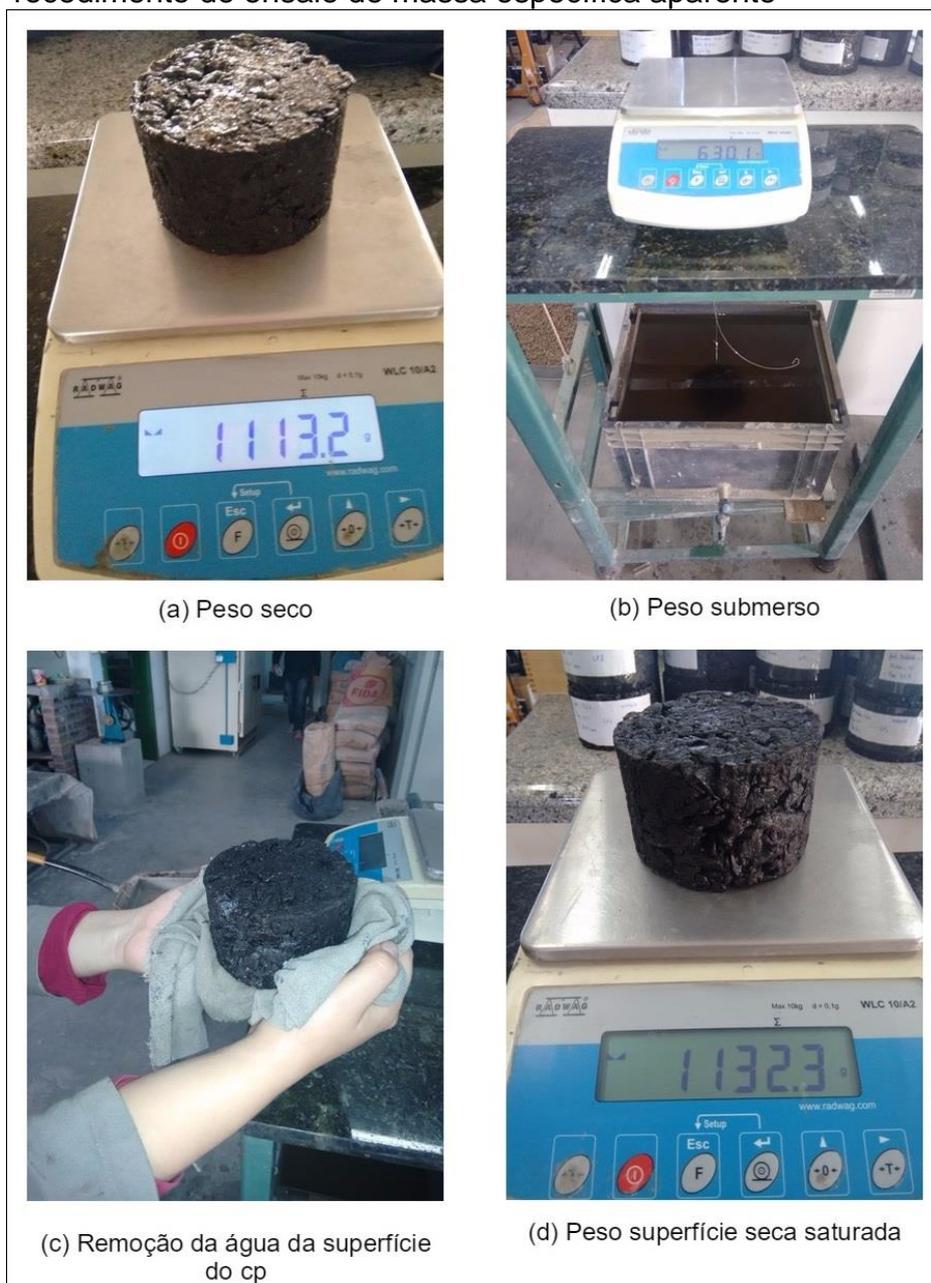
$M_{sss\ sub}$ = massa do corpo de prova submerso em água (g);

0,9971 = massa específica da água a 25°C (g/cm³).

O ensaio é normatizado pelo DNIT 117/2010 e foi obtido em laboratório. Inicialmente, pesou-se o corpo de prova ao ar, obtendo a massa seca (M_s), após, pesou-se o corpo de prova imerso em água, em temperatura ambiente, obtendo-se a massa seca submersa ($M_{sss\ sub}$). Ao retirar o corpo de prova submerso em água, removeu-se com toalha úmida a água da superfície obtendo a massa saturada (M_{sss}).

A relação entre a massa seca do corpo de prova compactado e a diferença da massa saturada e posteriormente submersa é definida como massa específica aparente (G_{mb}). A Figura 22 ilustra os passos para a obtenção do parâmetro.

Figura 22 – Procedimento do ensaio de massa específica aparente



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, que 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.

Iniciou-se o procedimento com a pesagem de uma amostra de 1000g aproximadamente, colocado em um recipiente de massa conhecida, completo com água a temperatura ambiente a 25°C até cobrir toda a amostra. Após, aplicou-se uma pressão a vácuo residual no recipiente de 30mmHg 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 então, completou-se com água o recipiente para posterior pesagem. O Gmm foi determinado então pela Equação 2:

$$Gmm = \frac{A}{A+B-C} * 0,9971 \quad (2)$$

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 apresenta a sequência do procedimento realizado para o ensaio da massa específica máxima.

Figura 23 – Sequência para a determinação da massa específica máxima



Fonte: Elaboração própria

3.2.2.3 Volume de vazios x teor ótimo de ligante

A dosagem Marshall apresenta diversas alternativas para definir o teor de ligante asfáltico. Para esta pesquisa o volume de vazios (V_v) foi definido como correspondente a 4% para camadas de rolamento. Porém, o comportamento da mistura asfáltica com a adição de fibra de polipropileno resultou em valores superiores aos 4% estipulados, nos teores analisados e usualmente utilizados para misturas do tipo concreto asfáltico, conforme será analisado no Capítulo 4.

A Equação 3 foi utilizada para determinar este parâmetro:

$$Vv = \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \quad (3)$$

Onde:

Vv = volume de vazios (%);

Gmm = massa específica máxima (g);

Gmb = massa específica aparente (g)

3.2.3 Procedimentos metodológicos para a realização do estudo

Depois de moldados os corpos de prova no Laboratório de Solos e Pavimentação da UNIPAMPA, foram realizados os ensaios mecânicos. O quantitativo de corpos de prova segue conforme a Tabela 6 abaixo:

Ensaio	Quantidade		
	1% (24mm)	1% (12mm)	0,5% (12mm)
Dosagem Marshall	3 x 5	3 x 4	3 x 4
Módulo de resiliência e resistência à tração	-	-	-
Total	39 corpos de prova		

Fonte: Elaboração própria

No desenvolver da pesquisa, foi observado que não seria possível determinar o teor ótimo de ligante pelo critério dos 4% de volume de vazios, e desta forma optou-se por realizar os ensaios de Mr e RT com todos os corpos de prova moldados para a dosagem. Estas motivações serão explanadas no Capítulo 4, na seção 4.1.

3.2.4 Ensaios mecânicos

Neste trabalho foram realizados dois ensaios mecânicos, de módulo de resiliência e de resistência à tração por compressão diametral, no intuito de analisar o comportamento das misturas com diferentes teores de adição de fibras, na tentativa de evitar os principais tipos de defeitos recorrentes ao pavimento flexível.

3.2.4.1 Ensaio módulo de resiliência

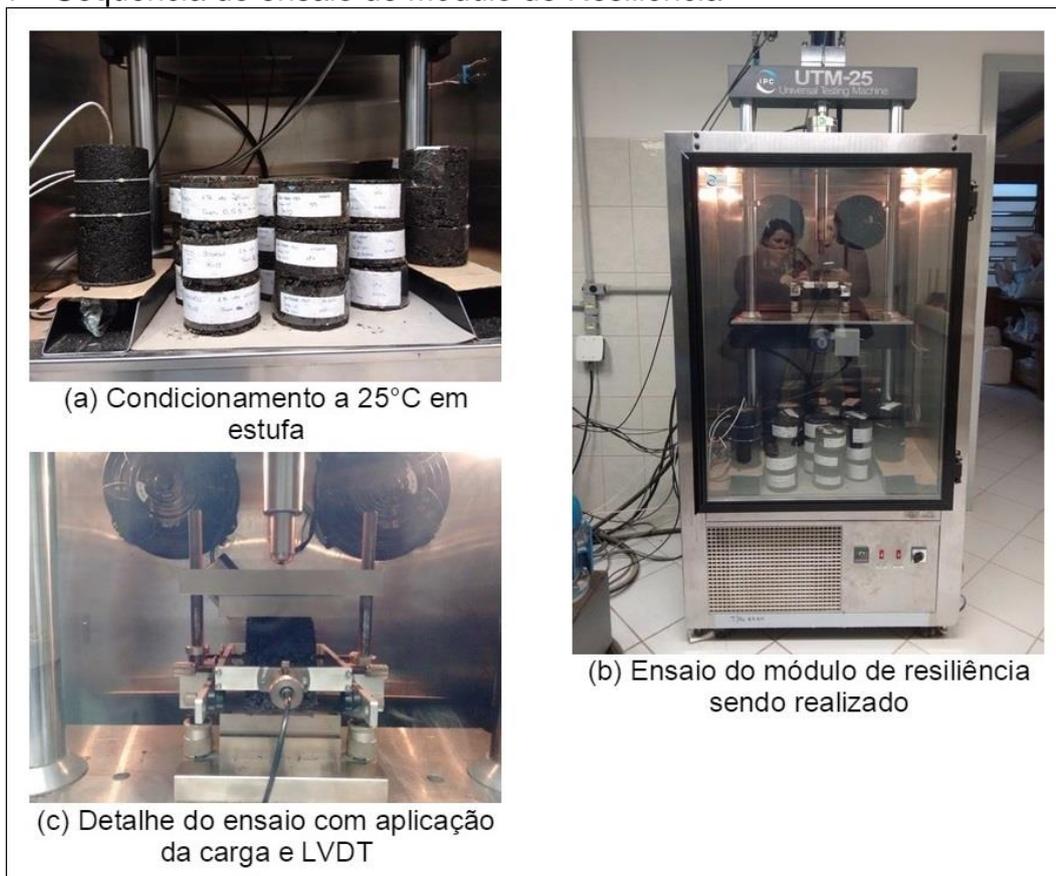
O ensaio do módulo de resiliência é normatizado no Brasil pelo DNIT 135/2010 – ME, e é definido pela relação entre a tensão de tração aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura asfáltica e a deformação específica recuperável, correspondente à tensão aplicada.

Os corpos de prova submetidos ao ensaio foram moldados no Laboratório de Solos e Pavimentos da UNIPAMPA e ensaiados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, onde previamente foram condicionados em estufa por 24h a 25°C.

Os CP's foram moldados com o compactador Marshall, com dimensões conhecidas, após foram posicionados no interior do suporte da prensa em sua superfície cilíndrica, 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 e registrar no microcomputador no início da escala linear.

Após ajustar os LVDT's iniciou-se o ensaio com 15 pulsos de carga para condicionamento e 5 pulsos de uma força de 700N para a obtenção do M_r , suficiente para deformar o corpo de prova sem causar danos irreversíveis. A carga foi aplicada com o tempo de 0,1s e 0,9s de repouso. O corpo de prova foi rotacionado a 90° e o ensaio realizado novamente. A sequência do ensaio segue conforme a Figura 24.

Figura 24 – Sequência do ensaio de Módulo de Resiliência



Fonte: Elaboração própria

Após o ensaio, com os valores obtidos, calculou-se o módulo de resiliência pela Equação 4.

$$Mr = \frac{P}{\Delta \cdot h} * (0,2692 + 0,9976 * \mu) \quad (4)$$

Onde:

Mr = módulo de resiliência (Mpa);

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

Δ = deslocamento elástico ou resiliente (mm);

h = altura do corpo de prova (mm);

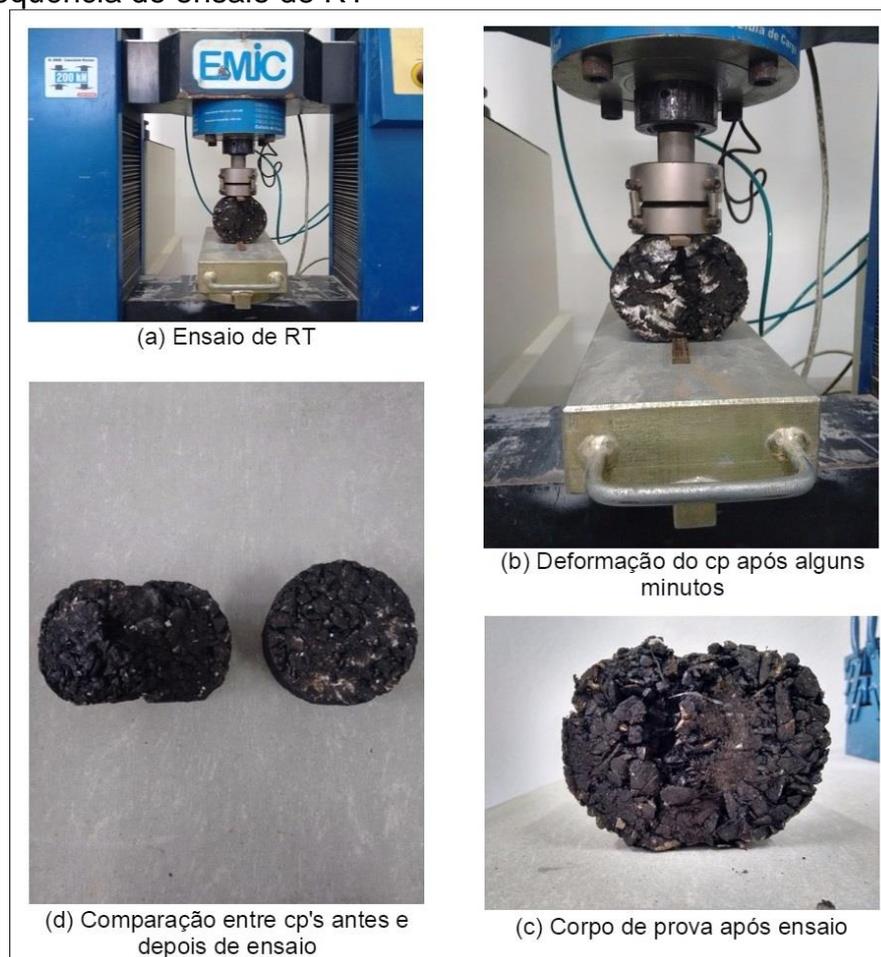
μ = coeficiente de Poisson (0,30).

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 e consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro, que geram ao longo do diâmetro solicitado tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro (BERNUCCI et al., 2008).

Os corpos de prova para este ensaio foram moldados conforme a dosagem Marshall com dimensões conhecidas de altura e diâmetro. Os mesmos foram condicionados em estufa em temperatura de 25°C por no mínimo 2 horas. Após, foram posicionados sob dois frisos metálicos de 12,7mm para que a carga fosse aplicada a uma velocidade de 1mm/min. A sequência do ensaio segue a Figura 25.

Figura 25 – Sequência do 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 5:

$$RT = \frac{2F}{\pi DH} \quad (5)$$

Onde:

RT = resistência à tração (kgf/cm²);

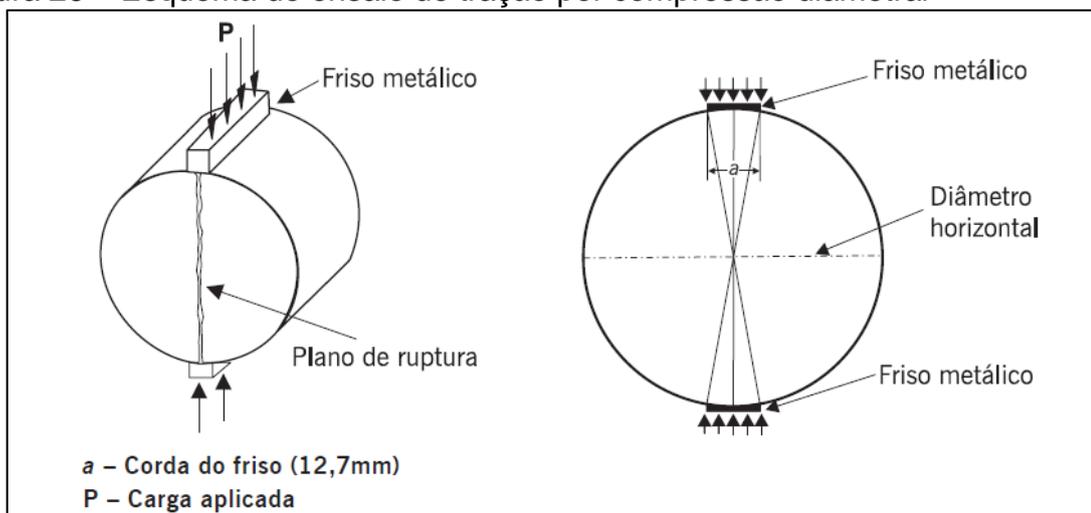
F = carga de ruptura (kgf);

D = diâmetro do corpo de prova (cm);

H = altura do corpo de prova (cm).

A Figura 26 indica o plano de ruptura causado pelo ensaio:

Figura 26 – Esquema do ensaio de tração por compressão diametral



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

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises volumétricas e dos ensaios mecânicos de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral, bem como compará-los a uma mistura convencional e uma mistura com adição de fibra de polipropileno realizada por Heck (2015).

4.1 Caracterização volumétrica das misturas

As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados obtidos para a massa específica aparente (G_{mb}), detalhada na seção 3.2.2.1. Os resultados foram obtidos pela Equação 1, sendo que cada valor de G_{mb} representa a média de três ensaios correspondentes a três corpos de prova.

Tabela 7– Massa específica aparente (G_{mb})

Adição de 1% de 24 mm	
Teor de ligante (%)	Massa específica aparente (g/cm^3)
5,5	2,189
6	2,221
6,5	2,215
7	2,238
7,5	2,219

Fonte: Elaboração própria

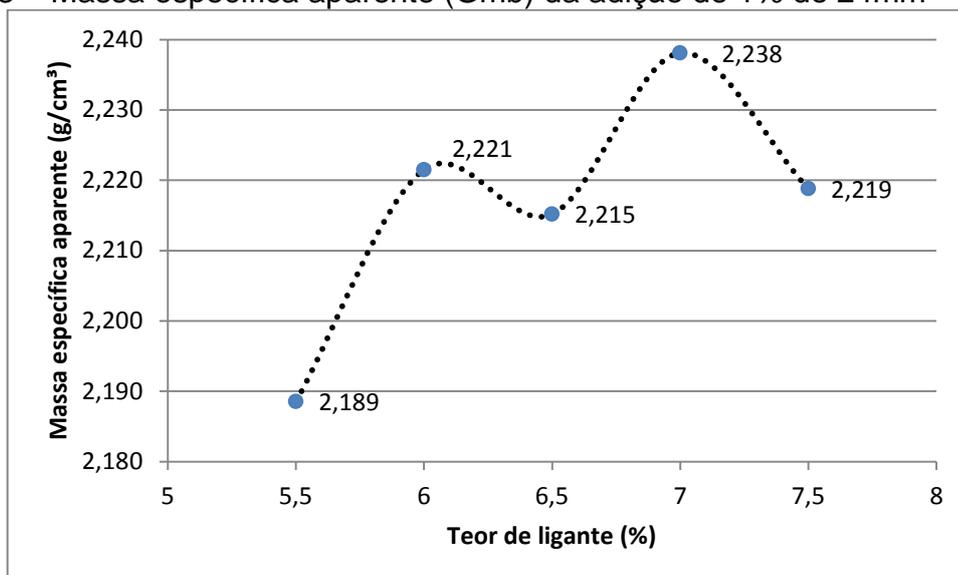
Tabela 8 – Massa específica aparente (G_{mb})

Adição de 1% de 12 mm		Adição de 0,5% de 12 mm	
Teor de ligante (%)	Massa específica aparente (g/cm^3)	Teor de ligante (%)	Massa específica aparente (g/cm^3)
6	2,236	6	2,288
6,5	2,253	6,5	2,315
7	2,249	7	2,285
7,5	2,227	7,5	2,273

Fonte: Elaboração própria

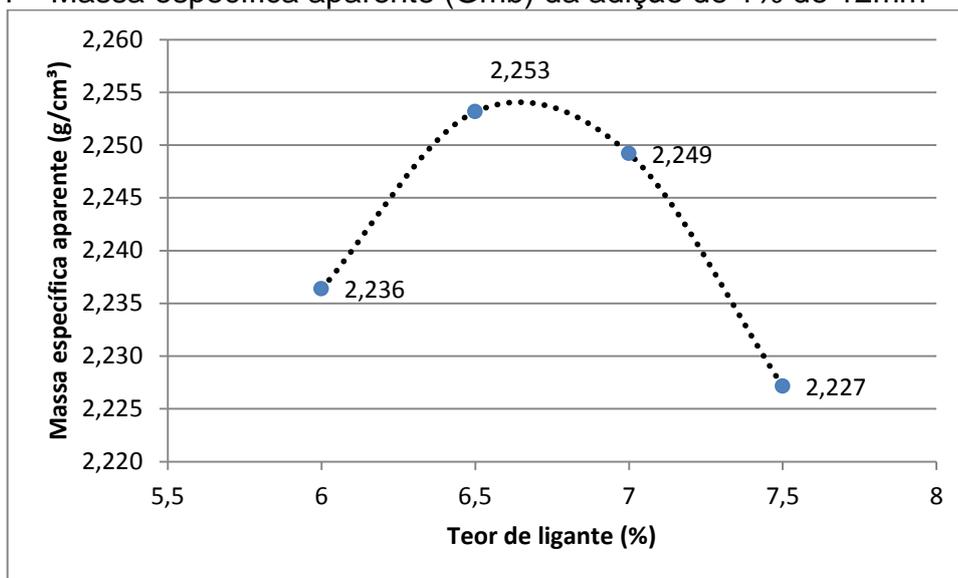
Os Gráficos 3, 4 e 5 sintetizam os dados apresentados nas Tabelas 7 e 8. Os gráficos referem-se aos dados de massa específica aparente para cada uma das adições propostas.

Gráfico 3 – Massa específica aparente (Gmb) da adição de 1% de 24mm



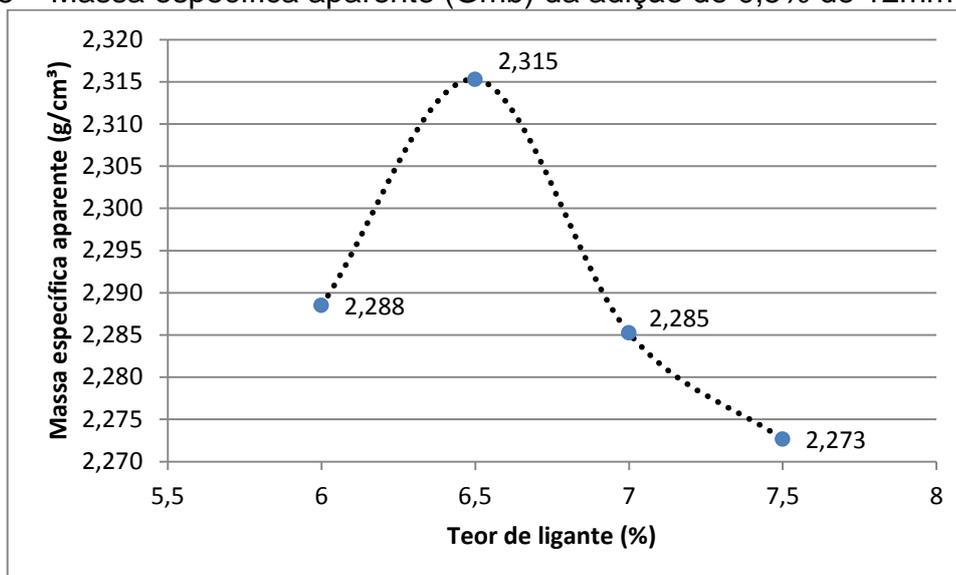
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 4 – Massa específica aparente (Gmb) da adição de 1% de 12mm



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 5 – Massa específica aparente (Gmb) da adição de 0,5% de 12mm



Fonte: Elaboração própria

As Tabelas 9 e 10 apresentam os resultados obtidos para a massa específica máxima (Gmm), descritas na seção 3.2.2.2. Os resultados foram obtidos pela Equação 2, sendo que cada um dos valores é a média de três ensaios realizados.

Tabela 9 – Massa específica máxima (Gmm)

Adição de 1% de 24 mm	
Teor de ligante (%)	Massa específica máxima (g/cm³)
5,5	2,445
6	2,406
6,5	2,384
7	2,376
7,5	2,339

Fonte: Elaboração própria

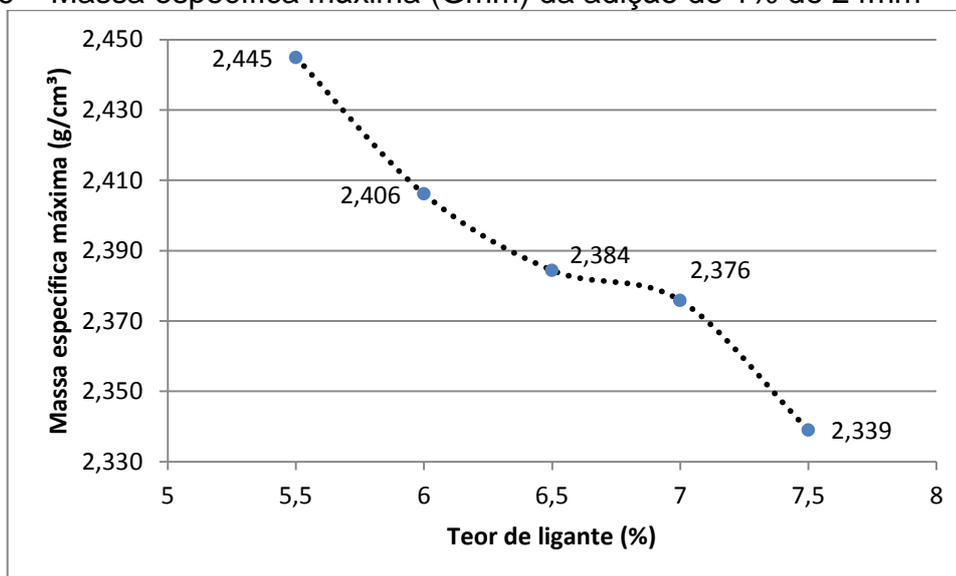
Tabela 10 – Massa específica máxima (Gmm)

Adição de 1% de 12 mm		Adição de 0,5% de 12 mm	
Teor de ligante (%)	Massa específica máxima (g/cm³)	Teor de ligante (%)	Massa específica máxima (g/cm³)
6	2,444	6	2,458
6,5	2,382	6,5	2,452
7	2,369	7	2,406
7,5	2,309	7,5	2,185

Fonte: Elaboração própria

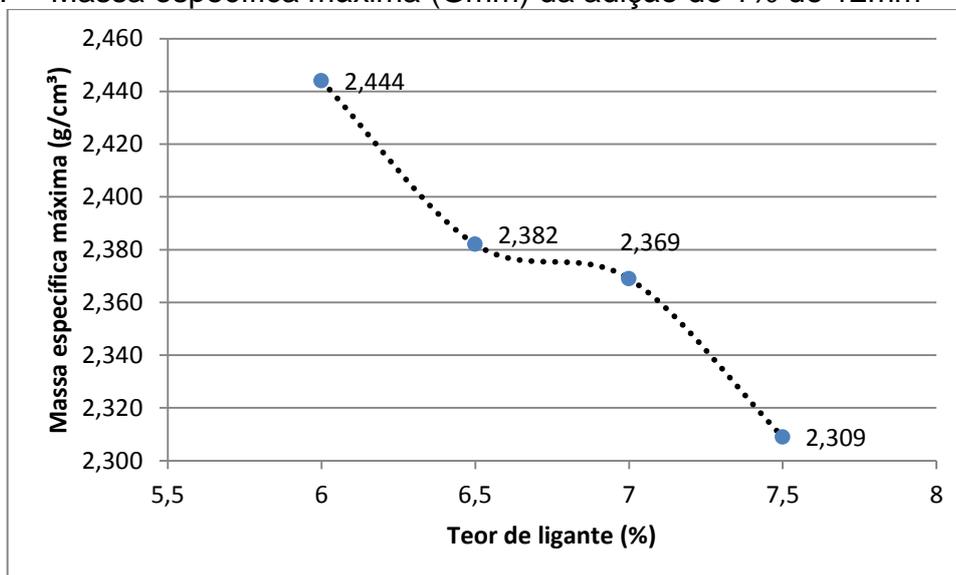
Os Gráficos 6, 7 e 8 apresentam os dados das Tabelas 9 e 10, referentes à massa específica máxima das misturas ensaiadas.

Gráfico 6 – Massa específica máxima (Gmm) da adição de 1% de 24mm



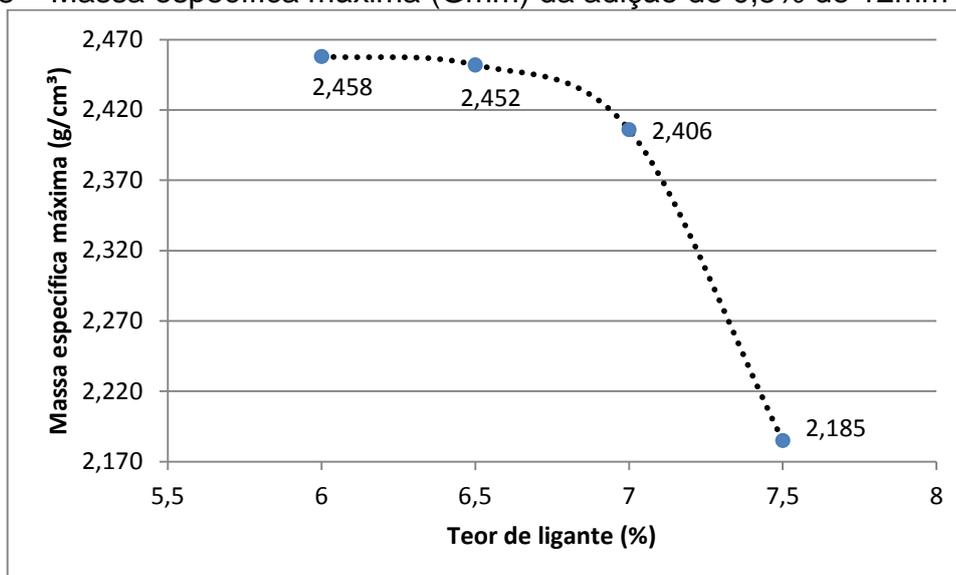
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 7 – Massa específica máxima (Gmm) da adição de 1% de 12mm



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 8 – Massa específica máxima (Gmm) da adição de 0,5% de 12mm



Fonte: Elaboração própria

Após os resultados dos ensaios de massa específica aparente e máxima, foi possível determinar o volume de vazios para cada uma das adições, utilizando a Equação 3 da seção 3.2.2.3. As Tabelas 11, 12 e 13 apresentam um resumo das massas específicas calculadas, bem como o volume de vazios, sendo a última coluna, a média de três corpos de prova para cada teor de ligante.

Tabela 11 – Volume de vazios para 1% de 24mm

Adição de 1% de 24 mm			
Teor de ligante (%)	Gmb (g/cm³)	Gmm (g/cm³)	Volume de vazios (%)
5,5	2,189	2,445	10,490
6	2,221	2,406	8,365
6,5	2,215	2,384	7,095
7	2,238	2,376	5,791
7,5	2,219	2,339	5,140

Fonte: Elaboração própria

Tabela 12 – Volume de vazios para 1% de 12mm

Adição de 1% de 12 mm			
Teor de ligante (%)	Gmb (g/cm ³)	Gmm (g/cm ³)	Volume de vazios (%)
6	2,236	2,444	8,496
6,5	2,253	2,382	5,422
7	2,249	2,369	5,038
7,5	2,227	2,309	3,545

Fonte: Elaboração própria

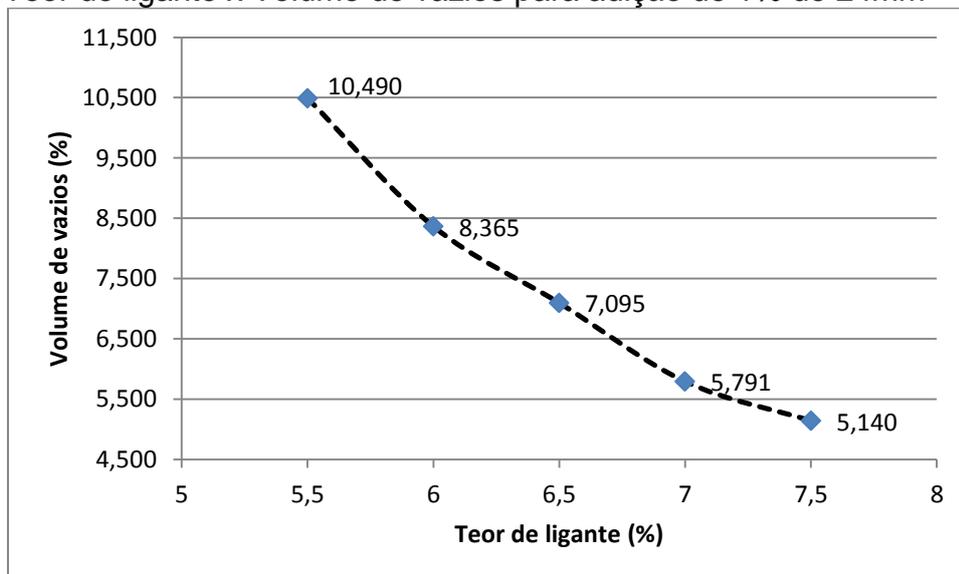
Tabela 13 – Volume de vazios para 0,5% de 12mm

Adição de 0,5% de 12 mm			
Teor de ligante (%)	Gmb (g/cm ³)	Gmm (g/cm ³)	Volume de vazios (%)
6	2,288	2,458	6,878
6,5	2,315	2,452	5,575
7	2,285	2,406	5,020
7,5	2,273	2,185	4,700

Fonte: Elaboração própria

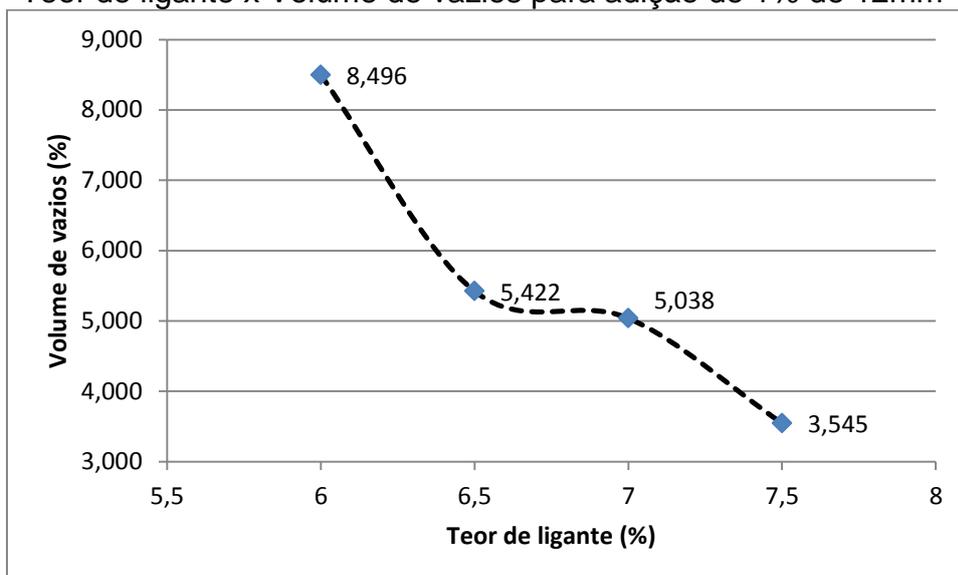
Os Gráficos 9, 10 e 11 relacionam o teor de ligante das misturas com o volume de vazios, conforme as Tabelas 11, 12 e 13.

Gráfico 9 – Teor de ligante x Volume de vazios para adição de 1% de 24mm



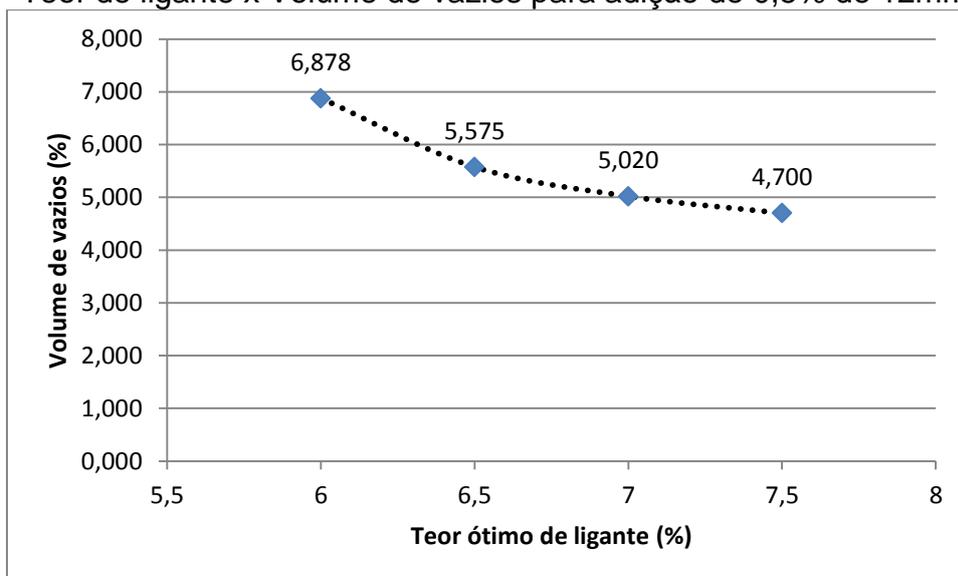
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 10 – Teor de ligante x Volume de vazios para adição de 1% de 12mm



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 11 – Teor de ligante x Volume de vazios para adição de 0,5% de 12mm



Fonte: Elaboração própria

Analisando os Gráficos 9, 10 e 11 percebe-se que o volume de vazios determinado na seção 3.2.2.3 não é atendido, uma vez que os valores de Vv mais próximos a 4% correspondem nos gráficos a valores altos de teor ligante, em torno de 7,5%.

Para verificar se o valor (7,5%) pode ser utilizado como teor ótimo deve ser feito o ensaio de deformação permanente (flow number ou creep). O excesso de ligante causa à exsudação da mistura, provocando patologias no pavimento, como os afundamentos.

Os fatores citados acima motivaram que os ensaios mecânicos fossem realizados para todos os corpos de prova moldados, pois é necessário conhecer o comportamento mecânico dos mesmos, visto que há poucas pesquisas utilizando as fibras de polipropileno na adição de misturas asfálticas.

Os resultados de Vv obtidos para as três misturas predefinidas foram relacionados aos resultados obtidos por Heck (2015) que propôs um comparativo entre uma mistura convencional e uma mistura com adição de 0,5% de fibra de 24mm. Para a mistura convencional o teor ótimo de ligante obtido correspondeu a aproximadamente 6%, e na mistura com fibras ficou entre 6 e 6,5%. A diferença entre as duas misturas justificou-se pelo fato das fibras incorporarem mais ligante do que uma mistura convencional.

4.2 Caracterização mecânica das misturas

Para avaliar o comportamento mecânico da mistura asfáltica com adição de fibra de polipropileno, o módulo de resiliência foi determinado. Utilizando a Equação 4 da seção 3.2.4.1, os dados obtidos são apresentados nas Tabelas 14, 15 e 16. Tanto para módulo de resiliência quanto para resistência à tração por compressão diametral, todos os corpos de prova foram ensaiados.

Tabela 14 – Módulo de Resiliência para adição de 1% de 24mm

Módulo de Resiliência para adição de 1% de 24mm			
CP	Teor de ligante (%)	Mr (MPa)	Mr (MPa)
1	5,5	2841	2534
2	5,5	2482	
3	5,5	2278	
4	6	2850	2550
5	6	2523	
6	6	2278	
7	6,5	2669	2499
8	6,5	2388	
9	6,5	2441	
10	7	2892	2879
11	7	2990	
12	7	2756	
13	7,5	2494	2663
14	7,5	3038	
15	7,5	2459	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 15 – Módulo de Resiliência para adição de 1% de 12mm

Módulo de Resiliência para adição de 1% de 12mm			
CP	Teor de ligante (%)	Mr (MPa)	Mr (MPa)
1	6	3689	3736
2	6	4274	
3	6	3247	
4	6,5	3786	4002
5	6,5	3590	
6	6,5	4629	
7	7	3989	3944
8	7	3949	
9	7	3896	
10	7,5	3029	3274
11	7,5	3147	
12	7,5	3648	

Fonte: Elaboração própria

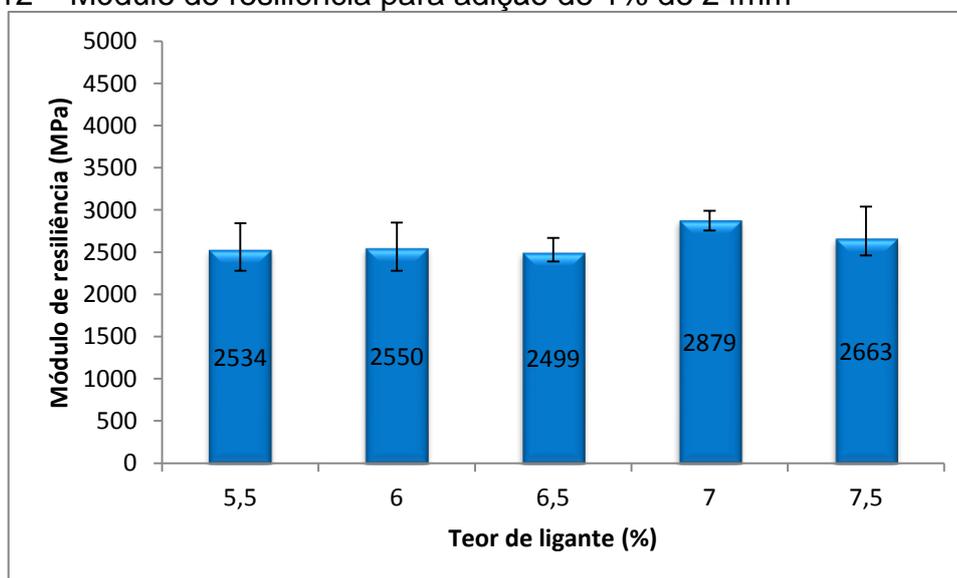
Tabela 16 – Módulo de Resiliência para adição de 0,5% de 12mm

Módulo de Resiliência para adição de 0,5% de 12mm			
CP	Teor de ligante (%)	Mr (MPa)	Mr (MPa)
1	6	4544	4471
2	6	4163	
3	6	4707	
4	6,5	4204	4222
5	6,5	4123	
6	6,5	4339	
7	7	3657	3682
8	7	3994	
9	7	3397	
10	7,5	4168	3680
11	7,5	3443	
12	7,5	3430	

Fonte: Elaboração própria

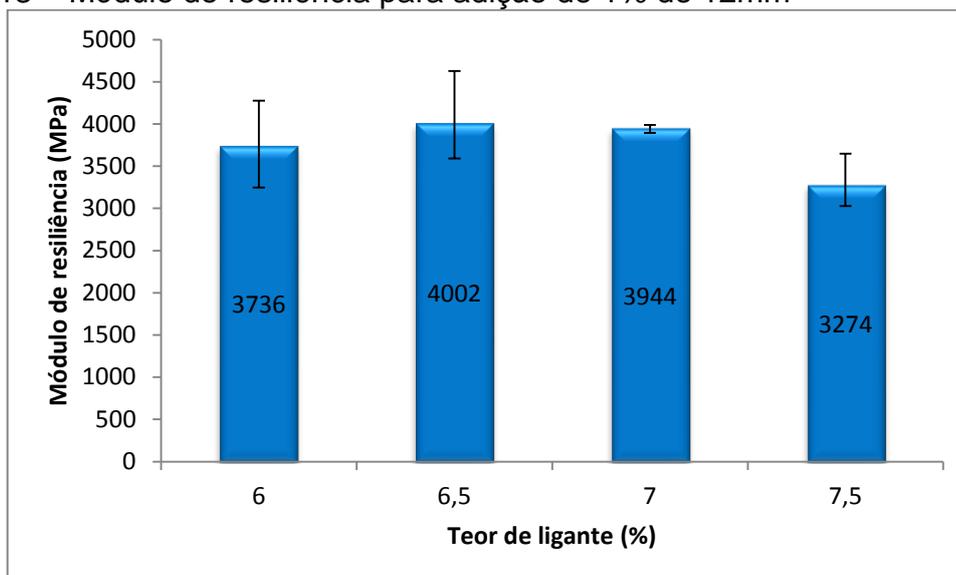
Os Gráficos 12, 13 e 14 apresentam os dados das Tabelas 14, 15 e 16, relacionando os teores de ligante (%) com o módulo de resiliência para cada uma das misturas propostas.

Gráfico 12 – Módulo de resiliência para adição de 1% de 24mm



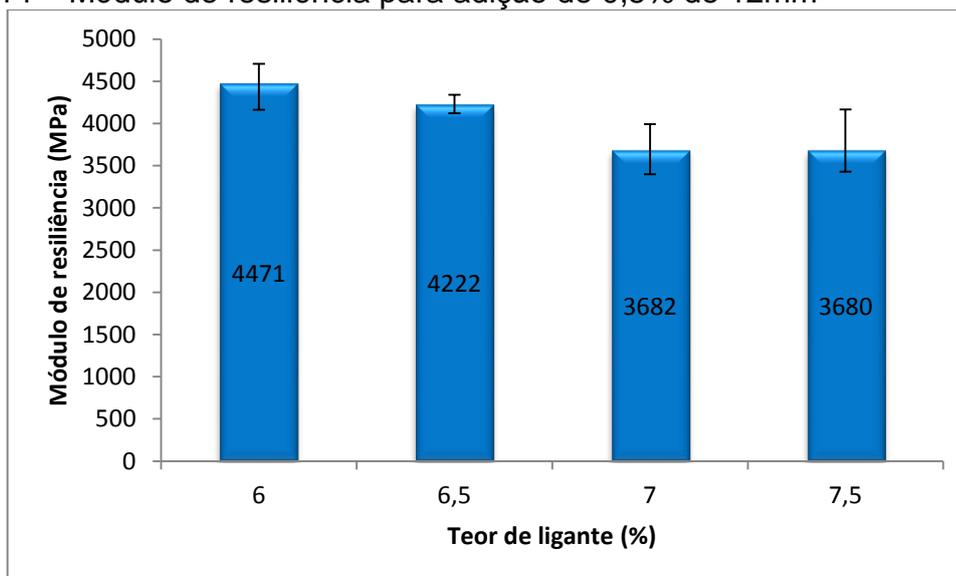
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 13 – Módulo de resiliência para adição de 1% de 12mm



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 14 – Módulo de resiliência para adição de 0,5% de 12mm



Fonte: Elaboração própria

Analisando os Gráficos 12, 13 e 14 de módulo de resiliência observa-se que os valores encontrados para a mistura de 1% de fibra de 24mm são inferiores aos valores correspondentes a adição de 1 e 0,5% de fibra de 12mm. Estes resultados mostram coerência, uma vez que, quanto maior a porcentagem e o comprimento de fibra adicionada, menor é o módulo de resiliência obtido. Pode-se afirmar também que a adição de fibras diminui a rigidez da mistura asfáltica.

Para cada uma das médias dos gráficos plotados, adicionou-se uma barra de erro, no valor positivo correspondente à variação entre o maior valor de M_r e a

média, e no valor negativo a média e o menor valor de Mr. Estes resultados mostram a dispersão dos dados encontrados.

Os resultados de Heck (2015) para Mr da mistura convencional equivalem a 3084MPa, valor relativamente maior que na mistura com fibras, onde o Mr fica em torno de 2183 e 2656MPa, valores correspondentes aos teores ótimos de ligante. Comparando os dois estudos, percebe-se que de forma geral a mistura convencional realizada por Heck (2015) e a menor adição proposta nesta pesquisa (0,5% de 12mm) contêm os maiores valores de Mr, uma vez que a rigidez é maior em mistura convencional ou em pequenas adições de fibras.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado conforme descrito na seção 3.2.4.2, e calculado pela Equação 5.

As Tabelas 17, 18 e 19 referem-se aos valores de RT de cada corpo de prova para as diferentes misturas, bem como suas médias.

Tabela 17 – RT para adição de 1% de 24mm

Resistência a tração para adição de 1% de 24mm			
CP	Teor de ligante (%)	RT (MPa)	RT (MPa)
1	5,5	2,486	2,040
2	5,5	1,938	
3	5,5	1,694	
4	6	2,196	2,298
5	6	2,522	
6	6	2,177	
7	6,5	2,249	2,103
8	6,5	2,117	
9	6,5	1,944	
10	7	2,056	2,118
11	7	2,072	
12	7	2,226	
13	7,5	2,103	2,165
14	7,5	2,667	
15	7,5	1,726	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 18 – RT para adição de 1% de 12mm

Resistência a tração para adição de 1% de 12mm			
CP	Teor de ligante (%)	RT (MPa)	RT (MPa)
1	6	1,997	2,366
2	6	2,914	
3	6	2,187	
4	6,5	2,922	2,528
5	6,5	2,244	
6	6,5	2,417	
7	7	3,399	2,981
8	7	3,115	
9	7	2,429	
10	7,5	2,194	2,715
11	7,5	2,792	
12	7,5	3,158	

Fonte: Elaboração própria

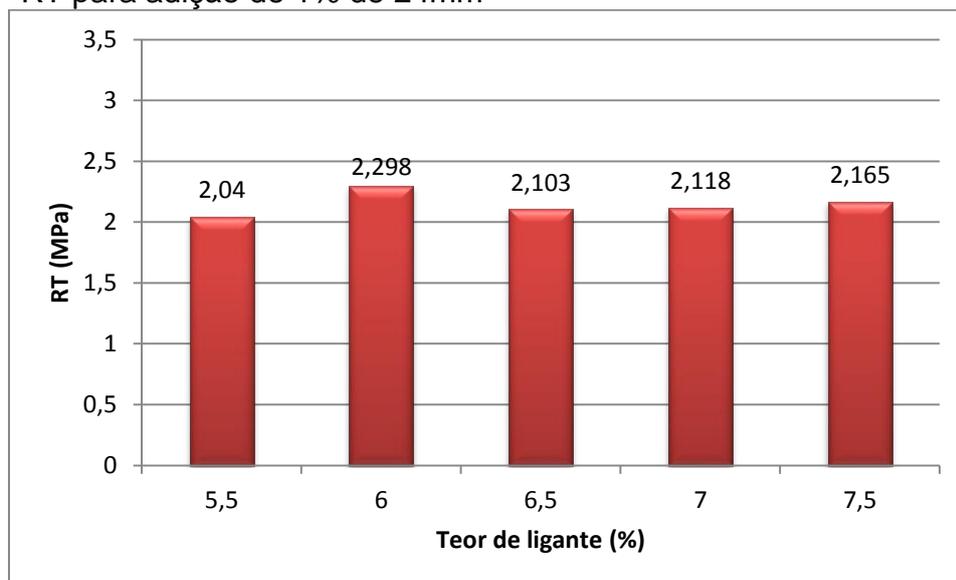
Tabela 19 – RT para adição de 0,5% de 12mm

Resistência a tração para adição de 0,5% de 12mm			
CP	Teor de ligante (%)	RT (MPa)	RT (MPa)
1	6	2,294	2,811
2	6	3,150	
3	6	2,990	
4	6,5	3,161	3,177
5	6,5	3,347	
6	6,5	3,022	
7	7	2,091	2,404
8	7	2,699	
9	7	2,422	
10	7,5	3,106	2,829
11	7,5	2,493	
12	7,5	2,888	

Fonte: Elaboração própria

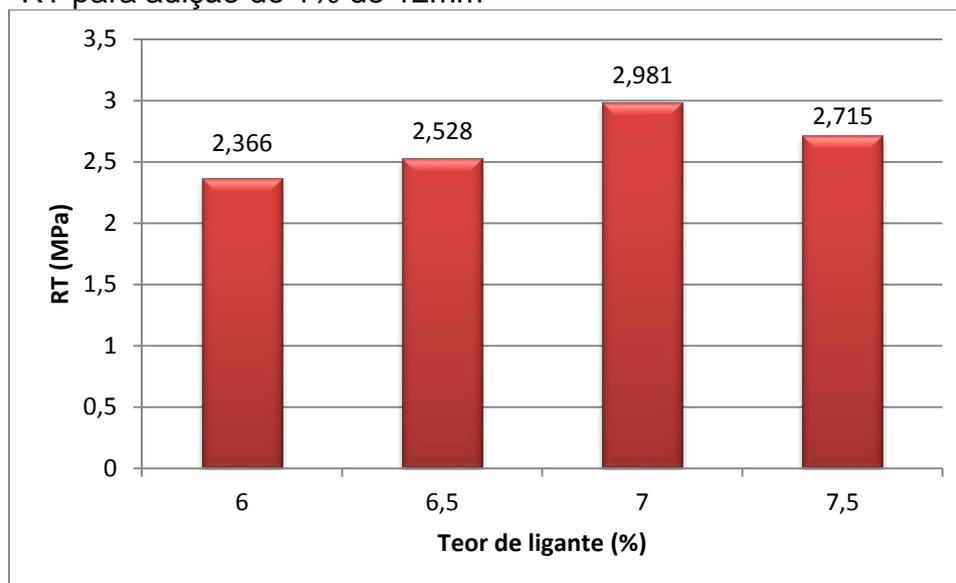
Os Gráficos 15, 16 e 17 relacionam os dados das Tabelas 17, 18 e 19 entre o teor de ligante e o valor médio da resistência a tração por compressão diametral para cada uma das misturas propostas.

Gráfico 15 – RT para adição de 1% de 24mm



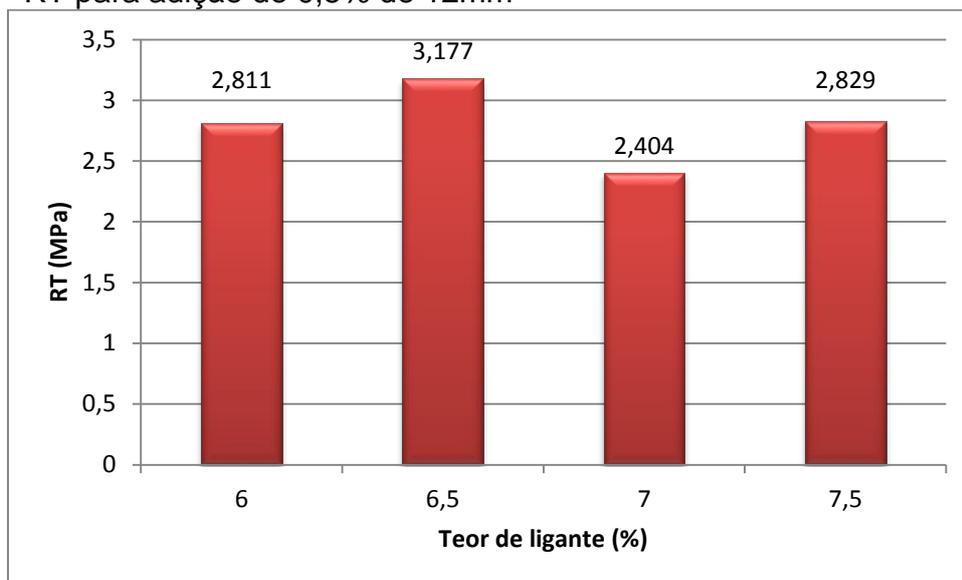
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 16 – RT para adição de 1% de 12mm



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 17 – RT para adição de 0,5% de 12mm



Fonte: Elaboração própria

Segundo a especificação de serviço da norma DNIT 031/2006, o valor mínimo limite para camada de rolamento de RT é 0,65MPa para uma temperatura a 25°C. Analisando o Gráfico 15 para a adição de 1% de 24mm percebe-se que as médias de RT mantêm-se com pouca variação para os diferentes teores, variando de 2,04 a 2,298MPa.

Para os Gráficos 16 e 17 a variação é um pouco maior entre os dados, porém, são superiores aos obtidos na mistura de 1% de 24mm, sendo a adição de 0,5% de 12mm com os maiores valores de RT, chegando a 3,177MPa no teor de 6,5% de ligante.

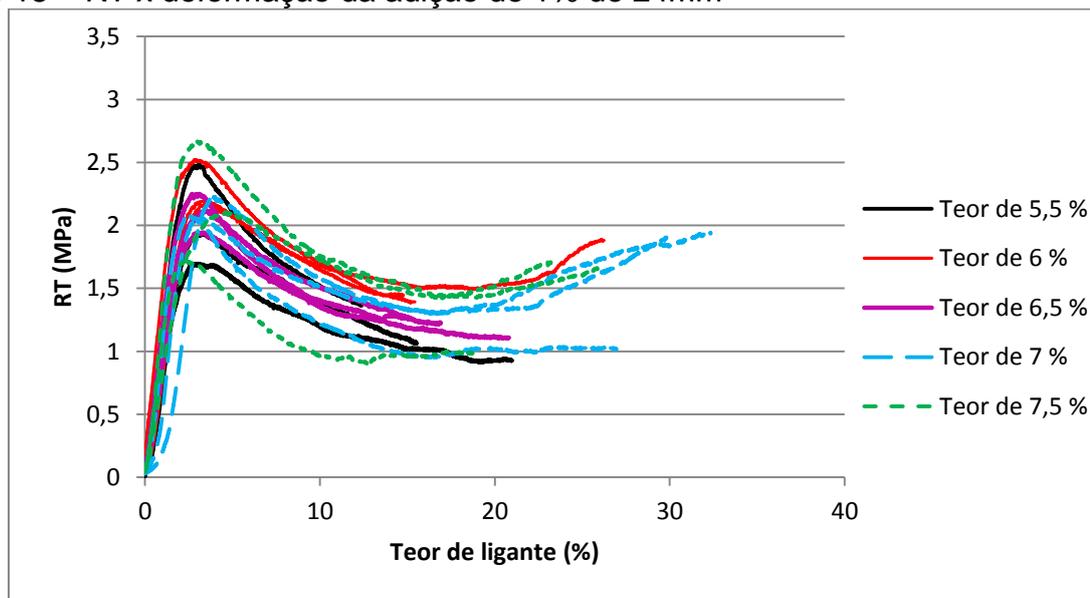
É importante salientar que todos os CP's para todos os teores foram ensaiados e analisados, uma vez que não foi possível determinar o teor ótimo de ligante ao volume de vazios predeterminado. De forma geral, os resultados encontrados são superiores ao limite recomendado pelo DNIT, porém, comparados a uma mistura convencional e uma adição de fibra estudadas por Heck (2015), percebe-se que os valores obtidos são muito superiores, indicando uma possível não conformidade.

Para a pesquisa de Heck (2015) a mistura convencional apresentou valor de RT igual a 1,141MPa, considerando o valor correspondente ao teor ótimo de ligante. Para a adição de 0,5% de fibra de 24mm a RT ficou entre 1,012 e 1,109MPa. Uma possível explicação para a diferença entre os dados desta pesquisa e da adição de Heck (2015) está na temperatura de ensaio. Embora tenha sido controlada a 25°C a

temperatura ambiente estava muito baixa, o que pode explicar os valores altos de resistência encontrados, visto que a prensa para realizar os ensaios não possui câmara climática para controle de temperatura.

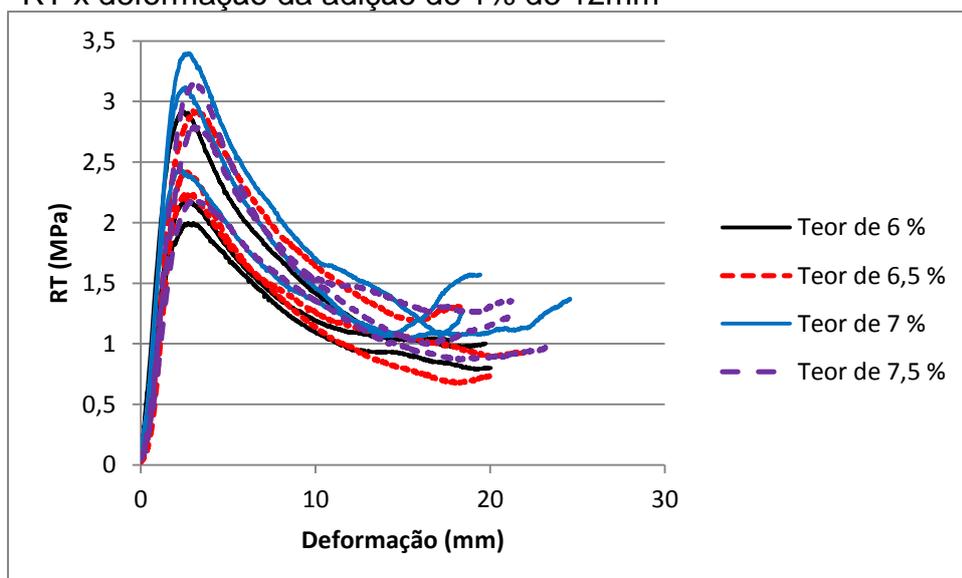
Os valores de RT de todos os teores ensaiados podem ser relacionados graficamente com a deformação, pelos Gráficos 18, 19 e 20.

Gráfico 18 – RT x deformação da adição de 1% de 24mm



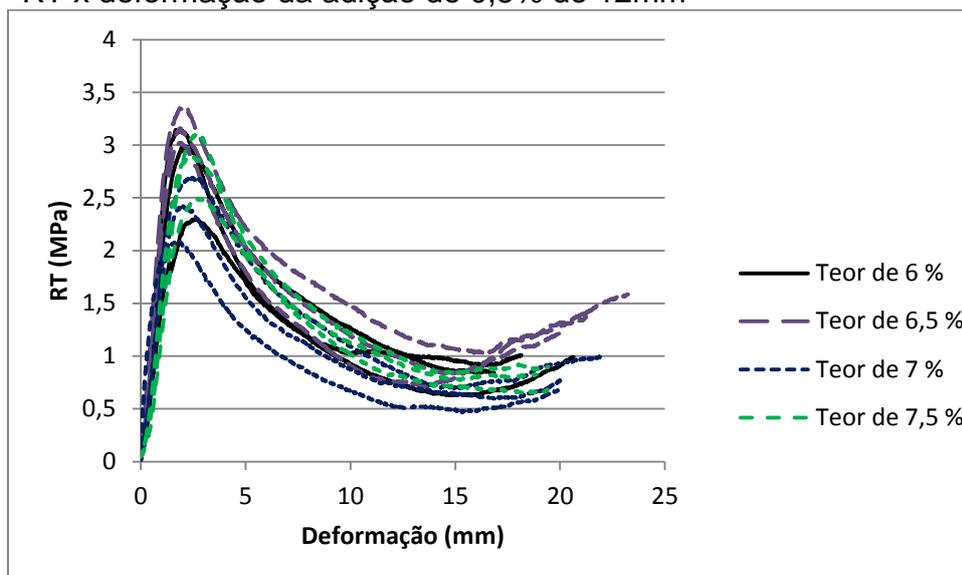
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 19 – RT x deformação da adição de 1% de 12mm



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 20 – RT x deformação da adição de 0,5% de 12mm



Fonte: Elaboração própria

Quando se analisa o comportamento dos gráficos, é possível verificar que as misturas com adição de fibra suportam maiores deformações sem que haja a ruptura dos corpos de prova, o que comprovam as Figuras 25c e 25d da seção 3.2.4.2.

Na pesquisa de Heck (2015) em uma deformação correspondente a 30mm a mistura com adição de fibras ainda suportava consideráveis carregamentos, enquanto na mistura convencional, essa deformação não chegava a 10mm, o que pode ser verificado nos Anexos A e B. Para as misturas propostas neste trabalho, pode-se analisar o mesmo comportamento, em deformações até 20mm observa-se que os corpos de prova ainda resistem a um carregamento considerável.

Os ensaios de RT foram pausados a partir da deformação de 20mm aproximadamente, pois a curva do gráfico de RT x deformação começou a aumentar, o que não era coerente, uma vez que os corpos de prova já estavam muito deformados e ocorria o esmagamento da amostra ensaiada, mudando a área de contato do corpo de prova com a prensa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para analisar a adição de fibras de polipropileno na mistura asfáltica, as propriedades mecânicas de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral foram realizadas para três misturas propostas: adição de 1% de fibra de 24mm, 1% de 12mm e 0,5% de 12mm.

Para encontrar o teor ótimo de ligante de cada mistura as características volumétricas foram analisadas. Para o volume de vazios correspondente a 4% não foi possível determinar o teor ótimo de nenhuma mistura, uma vez que os menores valores de V_v correspondiam a altos teores de ligantes e, para que os mesmos pudessem ser utilizados como teor ótimo, ensaios de deformação permanente devem ser realizados, como o flow number ou creep.

O alto teor de ligante para as adições justifica-se pelo fato de que as fibras são envoltas pelo ligante e seu interior apresenta ar, deixando assim a mistura com volume de vazios maior, como ocorreu na mistura de 1% de 24mm com V_v chegando a 10,49%.

Definir o teor ótimo de ligante das misturas em aproximadamente 7,5% poderia causar a exsudação da mesma, visto que visualmente as amostras apresentavam escorrimento de ligante, responsável por patologias nos pavimentos flexíveis, como os afundamentos. Deste modo, optou-se por submeter todos os corpos de prova aos ensaios mecânicos.

Após, o ensaio do módulo de resiliência foi realizado para as três misturas, sendo que a adição de 1% de 24mm apresentou os menores valores médios, entre 2625MPa, seguido da adição de 1% de 12mm e 0,5% de 12mm. Comparando ao estudo de Heck (2015) para uma mistura convencional e uma adição de 0,5% de 24mm, os valores obtidos são de 3084MPa para a convencional e de 2183MPa e 2656MPa para a adição, valores referentes ao teor ótimo de ligante.

Pode-se afirmar que os valores obtidos de M_r para as misturas estudadas de 0,5% de 12mm comprova que as fibras de polipropileno podem ser adicionadas a mistura asfáltica mantendo os padrões da mesma. O resultado mais alto obtido para a mistura convencional de Heck (2015) e para a adição de 0,5% de 12mm indicam maior rigidez da mistura em relação as misturas com adições de 1% de fibra e com comprimentos maiores.

Em relação à resistência a tração por compressão diametral os resultados indicaram que a adição de 0,5% de 12mm obteve os maiores valores de pico (3,177MPa) em relação as demais misturas, seguida pela adição de 1% de 12mm e 1% de 24mm. De modo geral, comparando a pesquisa de Heck (2015) para uma mistura convencional, concluiu-se que a adição de fibras suporta maiores deformações num período de tempo, com tensões inferiores as de pico, porém consideráveis e sem a ruptura dos corpos de prova.

Comparando ainda a pesquisa de Heck (2015), é possível observar que os valores de RT desta pesquisa são superiores aos encontrados para a adição de 0,5% de 24mm. Um dos motivos pode ser a influência da temperatura na realização do ensaio. Embora a sala e os corpos de prova estivessem sob temperatura controlada, a temperatura ambiente era baixa, o que pode ter influenciado os altos valores encontrados.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, outros parâmetros devem ser analisados para caracterizar e comparar a mistura com adição de fibras e a mistura convencional, como:

- Realizar ensaios de adesividade e vida de fadiga;
- Avaliar a utilização de diferentes tipos de ligante;
- Utilizar outros tipos de fibra para comparativos, como a fibra de aramida e fibras vegetais;
- Realizar trechos experimentais para verificar ao longo do tempo o desempenho quando solicitado ao tráfego real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L. P. **Pavimentos rodoviários**. 1 ed. Coimbra: Almeida, 2008.

CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. 2001. 109f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2014**. Brasília, 2014. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relGeral.aspx?origem=2#>>. Acesso em: 14 set. 2015.

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: 13 out. 2015.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. **Rede do SNV – Total 2014**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/download/planejamento-e-pesquisa/planejamento/evolucao-da-malha-rodoviaria/snv2014-total.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2015.

_____. NBR 005/2003 – TER. **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia**, 2003.

_____. **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.

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) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

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

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: 16 out. 2015.

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

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 2007.

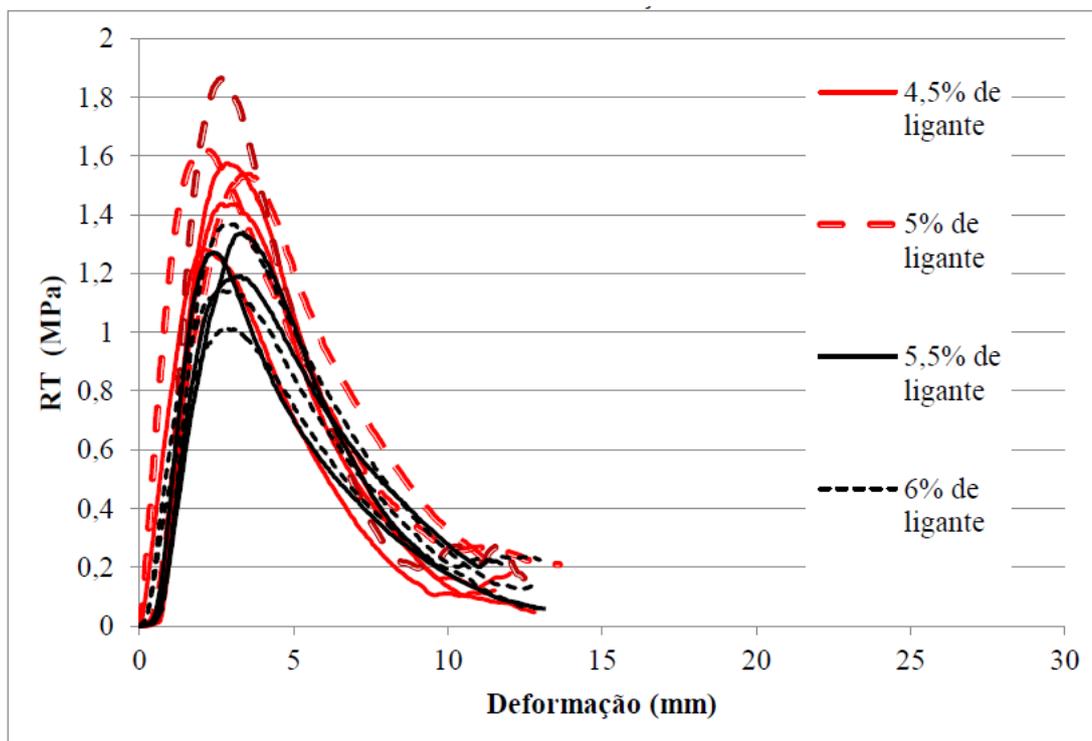
SILVA. P. F. A. **Manual de patologia e manutenção de pavimentos**. 2 ed. São Paulo: Editora Pini, 2008.

SOUZA, M. V. R. **Efeitos de fibras sintéticas nas propriedades de ligantes e concretos asfálticos.** 2010. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, 2010.

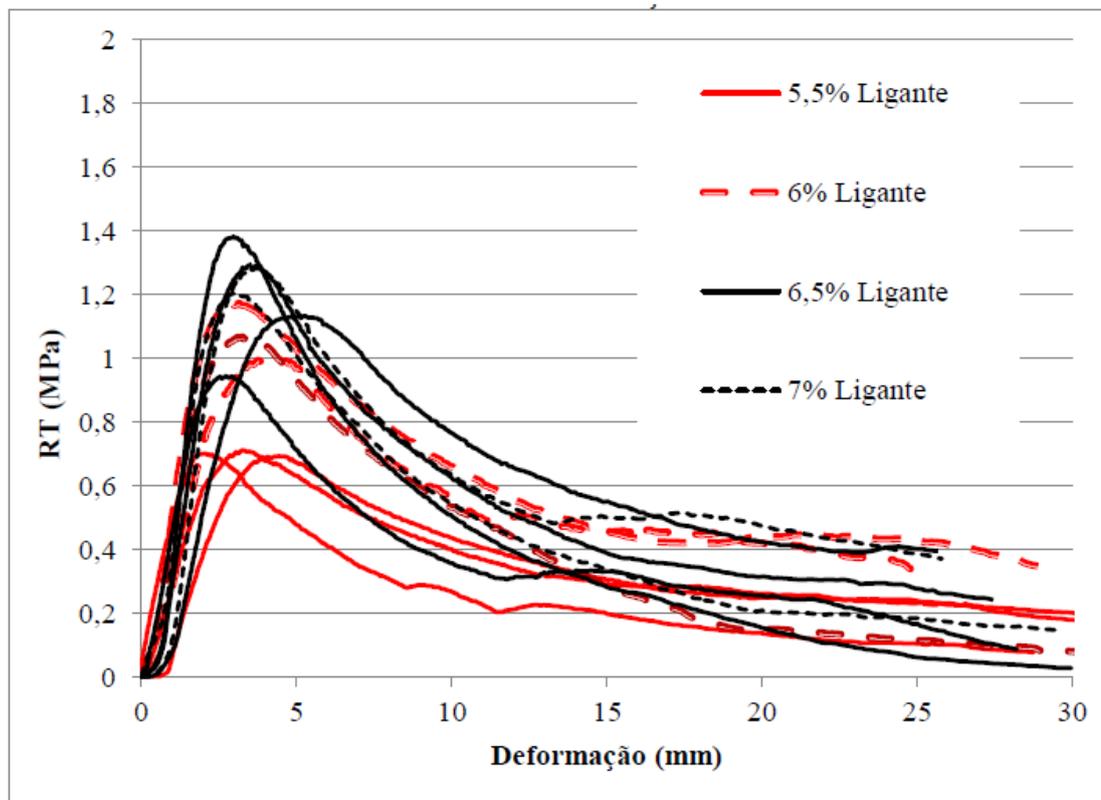
SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus.** 2004. 279f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TANESI, J.; FIGUEIREDO, A. D. **Fissuração por retração em concretos reforçados com fibras de polipropileno (CRFP).** Boletim técnico – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

ANEXOS

ANEXO A – RT x Deformação da mistura convencional

Fonte: HECK (2015, p. 69)

ANEXO B – RT x Deformação da mistura com fibras

Fonte: HECK (2015, p. 70)