



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA – UNIPAMPA
CENTRO DE TECNOLOGIA DE ALEGRETE – CTA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANDRESSA FERRAZZA HECK

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO COMO
MATERIAL DE REFORÇO EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Alegrete-RS
2015

ANDRESSA FERRAZZA HECK

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO COMO
MATERIAL DE REFORÇO EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

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

Orientador: M. Sc. Jaelson Budny

Alegrete-RS

2015

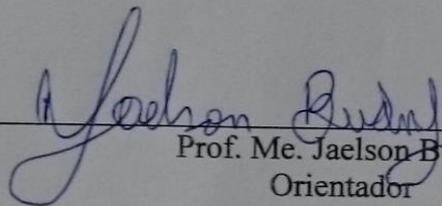
**ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO
COMO MATERIAL DE REFORÇO EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

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

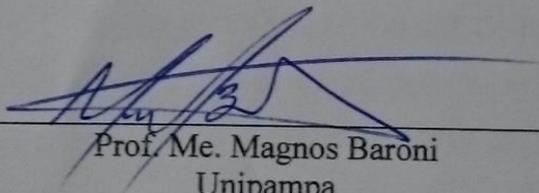
Área de concentração: Mecânica dos
pavimentos

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 08 de julho de 2015.

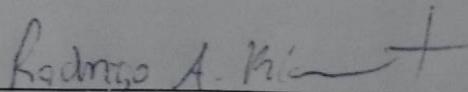
Banca examinadora:



Prof. Me. Jaelson Budny
Orientador
Unipampa



Prof. Me. Magnos Baroni
Unipampa



Prof. Me. Rodrigo André Klamt
Unipampa

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho com todo meu amor aos meus pais e minha irmã, que sempre me apoiaram em todas minhas escolhas e decisões.

Dedico também aos meus professores que tiveram paciência e disposição em passar todo o conhecimento que lhes era cabível e, dedico especialmente aos meus amigos, pela confiança, incentivo e apoio sempre.

“A vitória desta conquista dedico, sobretudo a todos vocês!”

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar força e coragem para enfrentar os obstáculos que tive no caminho.

Aos meus pais Moacir e Vera Heck e minha irmã Miriam Ferrazza Heck, pelo amor, paciência, incentivo e apoio incondicional durante todo esse período da graduação. Amo vocês!

Aos amigos que estiveram ao meu lado nessa jornada comemorando com minhas conquistas e me apoiando nas horas difíceis. Estando longe de casa, vocês foram fundamentais nesses anos.

A Universidade Federal do Pampa- Unipampa, por oportunizar esta conquista. Aos professores que tive ao longo da graduação, pelo incentivo e por se disporem a fazer tudo que estivesse ao alcance para passar seus conhecimentos, em especial ao professor e orientador Jaelson Budny, pelo apoio, orientação, dedicação e ensinamentos para a realização deste trabalho. Aos técnicos do laboratório de Engenharia Civil e do laboratório de Solos e Pavimentação da Unipampa por colaboraram plenamente na realização dos ensaios. A Universidade Federal de Santa Maria por disponibilizar seu laboratório para realização de ensaio.

E por fim, quero agradecer uma pessoa maravilhosa, que me amou, ajudou integralmente na minha educação e que sempre torceu pelo meu sucesso. Hoje ela não está mais presente em vida, mas tenho certeza que em todo esse tempo esteve olhando por mim e que de algum modo está comemorando comigo essa vitória. Vó Anair, te amo e sinto muito tua falta!

RESUMO

Devido os bons resultados que as adições de diversos tipos de fibras à matriz de concreto convencional tem proporcionado no que se refere ao aumento na capacidade de suporte, o presente trabalho teve por finalidade adicionar fibras de polipropileno na matriz de misturas asfálticas a fim de avaliar o comportamento mecânico da composição. A estrutura do estudo compreendeu inicialmente com a caracterização dos materiais utilizados, posteriormente a dosagem Marshall e caracterização volumétrica das misturas, e por fim dois ensaios mecânicos para avaliação: Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Ensaio de Módulo de Resiliência, ambos com o intuito de diferenciar as misturas convencionais das misturas com adição de fibras, analisando se ambas atendem os mínimos valores predefinidos por normas e a viabilidade do uso da fibra de polipropileno adicionada à mistura. De acordo com os resultados, ambas as misturas estão dentro das faixas de valores já estabelecidos tanto para resistência à tração por compressão diametral quanto no que diz respeito ao módulo de resiliência. Com isso pode-se afirmar que a utilização das fibras de polipropileno como material de reforço em pavimentos flexíveis é válida, pois mesmo suportando menores carregamentos de pico, a mesma apresentou no decorrer do tempo suportar maiores deformações quando ainda estavam agindo carregamentos consideráveis.

Palavras chave: misturas asfálticas, fibras de polipropileno, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Due to the good results that the additions of various types of fibers to conventional concrete matrix has provided with regard to the increase in carrying capacity, this study aimed to add polypropylene fibers in the matrix of asphalt mixtures in order to assess the mechanical behavior of the composition. The structure of the study initially realized with the characterization of the materials used, then the Marshall dosing and volumetric characterization of the mixtures, and finally two mechanical tests for evaluation: Traction resistance test by Diametral Compression and Resilience Module test, both with order to differentiate the conventional mixtures of mixtures with added fiber, analyzing if both meet the minimum preset values for standards and the feasibility of using the polypropylene added to the mixture of fiber. According to the results, both mixtures are within the range of values established for both tensile strength by diametrical compression and in regard to the modulus of resilience. Thus it can be said that the use of polypropylene fibers as reinforcement material in flexible pavements is valid, because even supporting lower peak loads, it presented over time withstand greater deformation when they were still acting considerable loads.

Keywords: asphalt mixtures, polypropylene fibers, mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção Transversal de um pavimento flexível.....	19
Figura 2 – Pavimento Rígido	20
Figura 3 – Pavimento flexível	20
Figura 4 - Tensões e Deformações em um Pavimento Flexível.....	23
Figura 5 - Variação da serventia no tempo	25
Figura 6 - Trinca isolada transversal.....	28
Figura 7 - Trinca isolada longitudinal	29
Figura 8 - Trinca interligada “Couro de Jacaré”	29
Figura 9 - Trinca interligada “Bloco”	29
Figura 10 - Afundamento Local	30
Figura 11 - Afundamento da Trilha de Roda	31
Figura 12 - Ondulação ou Corrugação	31
Figura 13 - Escorregamento	32
Figura 14 – Exsudação	32
Figura 15 – Desgaste.....	33
Figura 16 – Panela ou Buraco	34
Figura 17 - Remendo	34
Figura 18- Sequência dos procedimentos metodológicos realizados.	40
Figura 19 – Agregados	41
Figura 20- Materiais ensaiados	41
Figura 21- Ensaio de Análises Granulométricas	42
Figura 22- Agregados com a granulometria separada para a composição da mistura. ..	44
Figura 23- Composição da mistura	45
Figura 24 – Ligante Asfáltico	47
Figura 25 – Fibra de Polipropileno.....	49
Figura 26- Moldagem dos Corpos de Prova.....	50
Figura 27 – Ensaio de Massa Específica Aparente (GMB).....	51
Figura 28- Procedimentos de ensaios de Massa Específica Máxima (GMM).....	53
Figura 29 – Sequência do ensaio de Mr.....	55
Figura 30- Plano de ruptura das amostras por compressão diametral	56
Figura 31 - Sequência de ensaio de RT	56
Figura 32- Armazenamento dos CPs em estufa à 25°C	57
Figura 33- Exemplo de realização do ensaio em um equipamento	57

Figura 34- Corpos de prova convencionais já rompidos.	58
Figura 35- Posicionamento do CP com adição de fibras no equipamento.	58
Figura 36- CP com adição de fibras após a realização do ensaio.....	59
Figura 37- Corpo de prova de mistura asfáltica com adição no ensaio de RT	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio Granulométrico, percentual passante de material.....	43
Tabela 2: Composição de agregados na mistura.	45
Tabela 3: Ensaio de viscosidade do CAP 50/70.....	47
Tabela 4 - Quantidade de Corpos-de Prova Confeccionados..	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva Granulométrica das Graduações ensaiadas.....	43
Gráfico 2 – Curva Granulométrica de Trabalho / Faixa “C” do DNIT.....	46
Gráfico 3- Viscosidade do Ligante Asfáltico (CAP 50/70).....	48
Gráfico 4- Massa Específica Aparente de Mistura Convencional.....	60
Gráfico 5- Massa Específica Aparente de Mistura com Fibras.....	61
Gráfico 6- Massa Específica Máxima da Mistura Convencional.....	62
Gráfico 7- Massa Específica Máxima da Mistura Com Fibras.....	62
Gráfico 8- Teor ótimo de ligante da mistura convencional.....	63
Gráfico 9- Teor ótimo de ligante da mistura com adição de fibras.....	63
Gráfico 10- Mr da Mistura Convencional.....	65
Gráfico 11- Mr da Mistura com Fibras.....	66
Gráfico 12- RT da mistura convencional.....	68
Gráfico 13- RT da mistura com adição de fibras.....	68
Gráfico 14- Resultado dos Valores de RT x Deformação da mistura convencional.....	69
Gráfico 15- Resultado dos Valores de RT x Deformação da mistura com fibras.....	70
Gráfico 16- RT x Deformação dos corpos de prova com o teor ótimo de ligante.....	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação e codificação de fendas	27
Quadro 2 - Faixas Granulométricas	42
Quadro 3: Características do CAP 50/70.	46
Quadro 4- Massa Específica Aparente (GMB).	60
Quadro 5- Massa Especifica Máxima (GMM).	61
Quadro 6- Volume de Vazios Mistura Convencional.....	63
Quadro 7- Volume de Vazios Mistura com Fibras	63
Quadro 8- Resultado do Módulo de Resiliência na Mistura Convencional	64
Quadro 9- Resultado do Módulo de Resiliência na Mistura Com Fibras	65
Quadro 10- Resultados do ensaio de RT na mistura convencional.....	67
Quadro 11- Resultados do ensaio de RT na mistura com fibras.....	67

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivos.....	16
1.1.1. Objetivo geral	16
1.1.2. Objetivos específicos	17
1.2. Justificativa	17
1.3. Estrutura do trabalho	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1. Estruturas de pavimentos asfálticos	19
2.2. Análise estrutural de pavimentos flexíveis	22
2.3. Desempenho de pavimentos flexíveis	24
2.4. Mecanismos de degradação de pavimentos flexíveis.....	25
2.5. Tipos de patologias em pavimentos flexíveis.....	26
2.5.1. Fenda	27
2.5.1.1. Fissuras	28
2.5.1.2. Trincas	28
2.5.2. Afundamento	30
2.5.3. Ondulação e Corrugação.....	31
2.5.4. Escorregamento.....	31
2.5.5. Exsudação	32
2.5.6. Desgaste.....	33
2.5.7. Panela ou Buraco	33
2.5.8. Remendo	34
2.6. Utilização de fibras como material de reforço	35
2.6.1. Fibras minerais.....	37
2.6.2. Fibras metálicas.....	37
2.6.3. Fibras Sintéticas ou Poliméricas	38
2.6.3.1. Fibras de polipropileno	38
2.6.4. Fibras naturais	38
3 METODOLOGIA.....	40
3.1. Caracterização dos materiais	40
3.1.1. Agregados	40
3.1.1.1. Ensaio de Granulometria dos Agregados.....	41

3.1.2. Ligante.....	46
3.1.2.1. Ensaio de Viscosidade	47
3.1.3. Fibra de Polipropileno	48
3.2. Dosagem Marshall	49
3.2.1. Massa Específica Aparente (GMB)	51
3.2.2. Massa Específica Máxima (GMM)	52
3.2.3. Volume de Vazios x Teor Ótimo de Ligante.....	53
3.2.4. Procedimentos Metodológicos para Realização do Estudo	53
3.3. Ensaio Mecânicos	54
3.3.1. Ensaio de Módulo de Resiliência	54
3.3.2. Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	55
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	60
4.1. Caracterização Volumétrica da Mistura.....	60
4.2. Caracterização Mecânica das Misturas.....	64
5 CONCLUSÕES E SUJESTOES DE TRABALHOS FUTUROS	73
5.1. Sugestão para trabalhos futuros	74
REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

O governo de Juscelino Kubitschek, a partir de 1956, enfatizou grandes investimentos na malha rodoviária, sendo esta na época a principal forma de transporte devido a implantação da indústria automobilística. O que de fato impulsionou a utilização de pavimentação asfáltica no setor rodoviário foi à descoberta de poços de petróleo e a criação da Petrobras, o Brasil passou a produzir por volta de 2.663 barris por dia, 1,7% do consumo nacional (PETROBRAS, 2014), isso fez com que os combustíveis e seus derivados tivessem preços estimulantes. Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), em meados de 1950 o Brasil contava com 968 km de rodovias pavimentadas, e na década de 70 já chegava a 47 mil Km de pavimentação de rodovias em todo o país (DNIT, 2014).

Esse acelerado desenvolvimento se deu na época pela criação do Fundo Rodoviário Nacional (FRN) que arrecadava impostos sobre os combustíveis podendo assim financiar a construção das novas rodovias. Em meados de 1980, houve transferência do FRN para o Fundo Nacional de Desenvolvimento (FND), e a partir de então, este passou a contar apenas com investimentos anuais e financiamentos de bancos os quais não eram suficientes para atender a ampliação e manutenção da infraestrutura, isso fez com que em 1996 iniciasse o processo de concessões de algumas rodovias (BERNUCCI et al., 2008).

A matriz de transporte brasileira atualmente é predominantemente rodoviária e corresponde a 96,2% da matriz de transporte de passageiros e a 62,8% da matriz de transporte de cargas (CNT, 2006). Esta modalidade está em constante evolução, todavia devido à incapacidade dos gestores públicos em mantê-la em adequadas condições de trafegabilidade, ela não tem proporcionado aos usuários segurança e conforto esperados. De acordo com pesquisa da CNT, no ano de 2004 o levantamento quanto ao estado de conservação das rodovias pavimentadas avaliadas resultou num percentual expressivo, 74,7% eram classificadas como: Deficiente, Ruim ou Péssimo. Já no ano de 2012, esse índice era de 62,7%, o que se pode observar é uma breve melhoria, porém muito demorada.

Fazendo uma breve análise da situação deste modal, pode-se ressaltar que de 2004 a 2014 houve um aumento de apenas 13,8% da extensão da malha rodoviária brasileira, já nesse mesmo intervalo de tempo, a frota total de veículos aumentou 122,0% (CNT, 2014). Esse elevado aumento no volume de tráfego faz com que os esforços que são solicitados aos pavimentos consequentemente aumentem, com o decorrer disso a vida útil fica comprometida e os defeitos começam a se manifestar antes do tempo previsto.

De fato, o excesso de cargas causa a deterioração precoce dos pavimentos, pois a vida útil de uma rodovia cai em média 30%, e naquelas em que o tráfego é mais intenso e destinado a escoamento de produção, chega a representar a diminuição de 70%. Diante disto, pode-se afirmar que um pavimento dimensionado para durar 10 anos, resiste apenas 7 anos, e em casos mais críticos apenas 3 anos (CNT, 2014).

Os pavimentos não são dimensionados para durar eternamente, mas sim por um período de tempo no qual as condições evoluem de ótimas para ruim. As estruturas dos pavimentos apresentam-se cada vez mais suscetíveis aos defeitos dos materiais utilizados, ao modo de execução, efeitos climáticos e até mesmo ao método de dimensionamento, pois estes não foram rigorosamente analisados de acordo com a demanda da nova rodovia até mesmo pela dificuldade de controle dos órgãos fiscalizadores dos excessos de cargas. Essa degradação dos pavimentos se dá de forma gradativa, a partir da abertura ao tráfego, decorrente disto começa-se com tempo então acumular deformações plásticas e trincas no revestimento. Mais aptas a apresentarem um quadro patológico prematuramente, estas estruturas necessitariam ser reforçadas na tentativa de prolongar a durabilidade.

Na atualidade, as fibras de modo geral têm sido utilizadas em grande escala como materiais de reforços e reparos na construção civil. Segundo Sarzalejo et al. (2009), as fibras apresentam boa resistência mecânica à tração quando lançadas dentro de uma matriz cimentada, por função não impedem a formação de fissuras, mas formam uma “micro-armadura” que evita o surgimento de fissuras por retração, possibilitando assim um ganho de ductibilidade da mistura, pois as fibras “amarram” as fissuras e é isso que garante o aumento de resistência da mistura.

A viabilidade da utilização de fibras para reforço ou reparos na construção civil, tem apresentado bons resultados o que leva os demais ramos da engenharia civil estudar casos em que as fibras possam proporcionar ganhos vantajosos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Observar as técnicas de reforços com a adição de fibras sintética de polipropileno na camada de revestimento de pavimentos flexíveis tendem a aumentar a capacidade de suporte fazendo com que os danos causados pela aplicação das cargas sejam minimizados.

1.1.2. Objetivos específicos

- estudar o comportamento da estrutura de pavimentos flexíveis convencional;
- avaliar a influência da adição de fibras sintética de polipropileno na estrutura de pavimentos flexíveis;
- tecer comparações entre resultados obtidos das misturas asfálticas convencionais e das misturas asfálticas com adições de fibras.

1.2. Justificativa

Usualmente, estruturas de concreto têm utilizado fibras de aço e de outros materiais com o intuito de aumentar a ductilidade, estas por sua vez, também auxiliam na resistência à tração e controlam o processo de fissuração (OLIVEIRA, 2007).

No que diz respeito às fibras, as de polipropileno mostram-se muito promissoras, pois além de proporcionarem condições satisfatórias na sua utilização, a sua aplicação não é restrita, podendo ser utilizada na construção de terraplenos dentre outras obras de engenharia (TRINDADE et al., 2005).

A utilização de fibras vegetais também tem sido o foco de muitos estudos, pois além de apresentarem adequadas condições de uso, são de fácil obtenção e baixo custo. Vale (2007) realizou experimentos com misturas asfálticas tipo SMA (Stone Matrix Asphalt) com incorporação de fibras de celulose e de coco, os resultados obtidos foram satisfatórios.

Nos estudos de Casagrande (2012), a adição de fibras de polipropileno em pavimentos de concreto aumentou consideravelmente a capacidade de deformação da estrutura.

A incorporação de materiais em pavimentação e misturas betuminosas tem aumentado consideravelmente. Um exemplo de sucesso na última década vem sendo o uso de borracha de pneu junto a misturas de concreto asfáltico, os pneus que inicialmente eram um passivo ambiental passaram a ser vistos como uma matéria prima nobre para o reforço de pavimento.

Levando-se em consideração o aparecimento precoce de defeitos em pavimentos asfálticos e as inúmeras pesquisas com resultados satisfatórios com utilização de fibras como material de reforço em concretos convencionais, solos, fabricação de telhas, dentre outros, a pesquisa justifica-se na análise da viabilidade do uso de fibras como material de reforço em misturas asfálticas, técnica esta muito pouco explorada.

1.3. Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

No capítulo I, é apresentada a introdução, os objetivos gerais e específicos, as justificativas e a estrutura do trabalho.

No capítulo II, é abordado à Fundamentação Teórica, a qual é composta por: Estrutura dos Pavimentos Asfálticos; Análise Estrutural de Pavimentos Flexíveis; Desempenho de Pavimentos Flexíveis; Mecanismos de Degradação de Pavimentos Flexíveis, Tipos de Patologias em Pavimentos Flexíveis e Uso de Fibras como Material de Reforço.

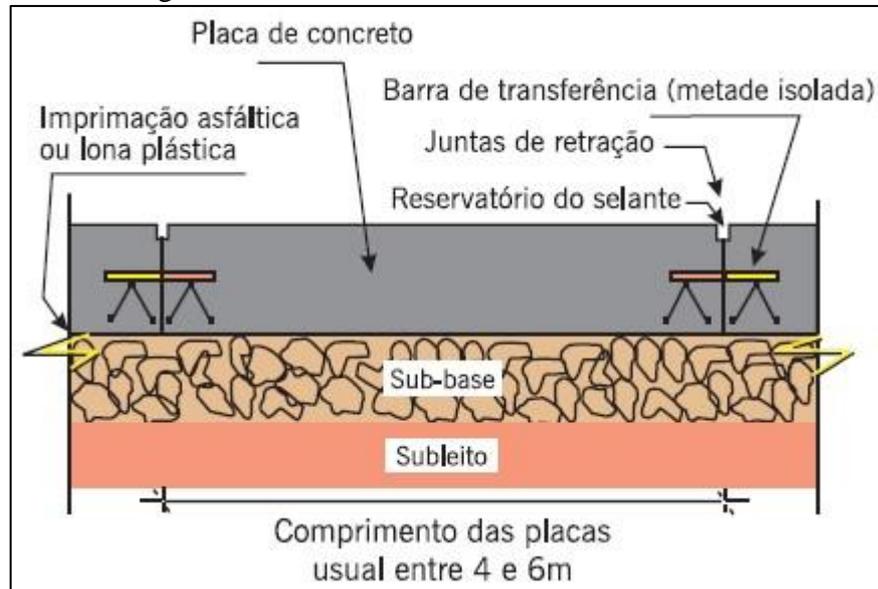
No capítulo III, é apresentada a metodologia para a realização da pesquisa, esta contempla: a realização de ensaios para caracterização dos materiais, a Dosagem Marshall, e os ensaios mecânicos de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência.

No capítulo IV, são apresentados os resultados e análises da caracterização volumétrica e mecânica das misturas asfálticas convencional e com adição de fibras.

No capítulo V, são apresentadas as considerações finais do projeto de estudo e as sugestões para trabalhos futuros.

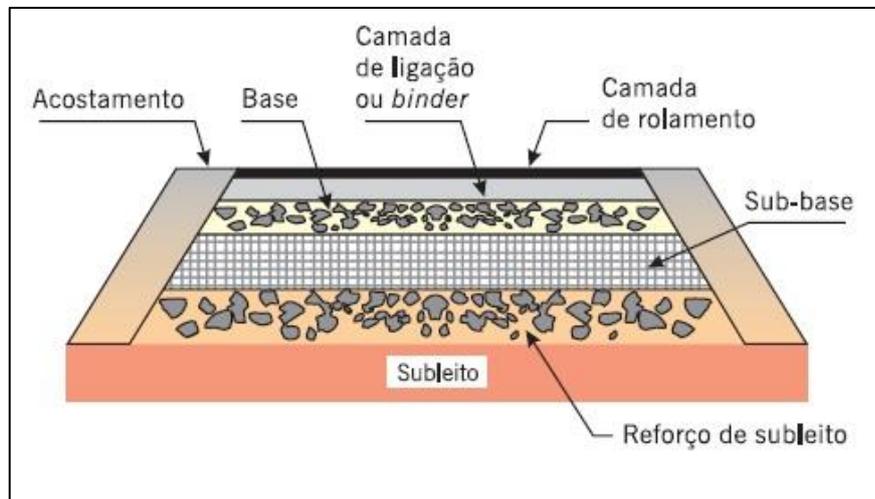
No capítulo VI, são apresentadas as referências bibliográficas.

Figura 2 – Pavimento Rígido



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

Figura 3 – Pavimento flexível



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

Há inúmeros motivos para o uso em grande escala de pavimentos asfálticos, pois o asfalto propicia união entre os agregados, age como ligante permitindo a flexibilidade, pode ser considerado um material impermeabilizante e que apresenta boa resistência à ação da maioria dos ácidos, álcalis e sais. Esses fatos mencionados fazem com que o asfalto na atualidade seja a mais importante forma de pavimentação no mundo. No Brasil, o índice de estradas pavimentadas com asfalto chega a representar 95% (BERNUCCI et al., 2008).

A estrutura dos pavimentos asfálticos tende a receber e transmitir esforços. Para o DNIT (2006b), todas as camadas tendem a sofrer deformações elásticas devido ao carregamento aplicado e este se distribui de forma similar em todas as camadas, sendo estas compostas por base (brita), sub-base (solo pedregulho) e camada superficial constituída por revestimento asfáltico.

O terreno que serve de fundação a pavimentos asfálticos é denominado subleito. Este é constituído normalmente por material natural compactado (já dispostos no corpo estradal) ou por material transportado e compactado (no caso de aterros). Os esforços transmitidos ao subleito são suavizados em profundidade pelas camadas que estão sobrepostas (BALBO, 2007). Por motivos técnicos ou econômicos, usualmente acima do subleito é colocada uma camada de espessura constante, conhecida como reforço do subleito, esta possui características geotécnicas superiores ao material de subleito, porém inferiores a próxima camada que virá acima (DNIT, 2006a).

Com o principal objetivo de transmitir aos veículos adequadas condições de suporte e rolamento, sob quaisquer que sejam as condições climáticas, as camadas que constituem o pavimento possuem uma ou mais funções particulares (BALBO, 2007).

A camada de revestimento recebe diretamente a ação dos veículos tendo como principal função estrutural resistir aos esforços solicitados. Exposta diretamente a intervenções climáticas, esta tanto que possível deve ser impermeável (BERNUCCI et al., 2008).

Com relação aos pavimentos asfálticos no Brasil Bernucci et al.(2008) ressalta:

Na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se como revestimento uma mistura de agregados minerais, de vários tamanhos, podendo também variar quanto à fonte, com ligantes asfálticos que, de forma adequadamente proporcionada e processada, garanta ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previsto para o local.

Devido o material que é empregado na composição do revestimento, o mesmo pode ser identificado em dois tipos, o que proporciona essa distinção é o ligante utilizado. Deste modo, podem ser classificados como revestimento a quente, quando usado CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) como ligante e revestimento a frio quando usado emulsão asfáltica (EAP) como ligante (BERNUCCI, 2008).

As camadas de base e sub-base são normalmente constituídas por solo, agregados, e em algumas situações, por aditivos como cimento, cal entre outros (BERNUCCI, 2008). Essas

camadas são responsáveis por absorverem a maior parte dos esforços transferidos do tráfego, distribuindo de maneira gradativa até o subleito. A utilização de tais materiais na composição de sua estrutura se dá pelo fato de que estas camadas estão sempre expostas a grandes cargas, necessitando assim de materiais com boas características mecânicas. Devido a isso pode-se afirmar que essas camadas estão diretamente ligadas na qualidade e durabilidade dos pavimentos (DNIT, 2006a).

No Brasil, o método de dimensionamento de pavimentos asfálticos ainda utilizado é baseado no CBR, sendo este adaptado a curvas de dimensionamento apresentadas por Turnbull et al. (1962) com a inclusão de coeficientes propostos pelo método de AASTHO. Este modelo de dimensionamento foi elaborado por Murillo Lopez de Souza em 1965 e no ano seguinte foi padronizado pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Apenas em 1981 houve uma correção no número “N”, que representa o tráfego, e desde então o método é utilizado em todo o país (MOTTA; MEDINA; 2006).

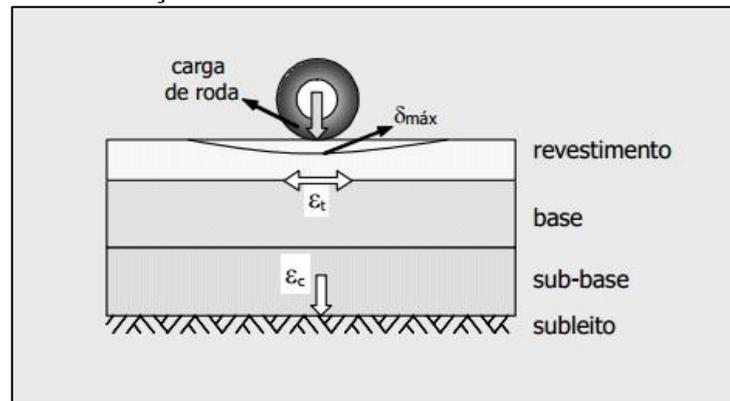
Tendo por função estrutural resistir às solicitações do tráfego, para o dimensionamento são analisados desde a superfície em contato com o pneu até as camadas mais profundas, sendo que as dimensões das camadas que o constitui dependem exclusivamente de dois pontos fundamentais: o tráfego e a capacidade de suporte do solo. Deste modo, os materiais utilizados para compor cada camada devem garantir o comportamento estrutural adequado (MOMM et al. 2011).

O funcionamento da estrutura de um pavimento é consequência de inúmeros fatores, sejam eles internos ou até mesmo externos. Dentre esses é válido ressaltar o tráfego a que estará sujeito, o meio ambiente e suas intervenções climáticas, e as propriedades tanto mecânicas quanto físicas das camadas do pavimento (VASSOLER; CHONG; SPECHT, 2011). Ainda pode-se afirmar que o pavimento tanto flexível quanto rígido tem seus estados de tensões e deformações modificados quando expostos a gradientes térmicos (MEDINA; MOTTA, 2005).

2.2. Análise estrutural de pavimentos flexíveis

Para Franco (2007, p. 23), “a estrutura de um pavimento asfáltico é representada por um meio estratificado, submetido a um carregamento superficial distribuído em uma área circular podendo ser modelada por meio da Teoria da Elasticidade”. A Figura 4 representa as principais deformações e deslocamentos que ocorrem na estrutura interna do pavimento flexível.

Figura 4 - Tensões e Deformações em um Pavimento Flexível



Fonte: Franco (2007, p. 23)

Para critérios de cálculo das tensões-deformações e deslocamento ocorridos, a teoria da elasticidade é bastante difundida e utilizada. Os métodos de análise que atualmente estão em uso, consideram que os materiais apresentam quanto ao estado de tensão-deformação, dois tipos de comportamento: elástico linear e elástico não linear (FRANCO, 2007).

Segundo Balbo (2007), “Um ferramental básico para a análise mais completa das estruturas de pavimentos é a Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas, que permite a determinação de estados de deformações e tensões em vários pontos das camadas”. Isto possibilita a aplicação dos modelos de degradação por fadiga ou deformação plástica dos materiais.

Pavimentos asfálticos com camadas granulares espessas, a consideração de não linearidade é indispensável. Deste modo, para o problema de elasticidade não linear é aplicado o método dos elementos finitos (MEDINA; MOTTA, 2005).

A durabilidade no que se refere à fadiga (deformação elástica repetida) e trilhas de roda (deformação plástica) é garantida quando dimensionado e executado um projeto onde a dosagem da mistura seja feita de modo a atender as condições climáticas que estão sujeitas as distintas estruturas do pavimento. No que diz respeito a deformações plásticas, pode-se afirmar que a mesma está diretamente relacionada com a composição do pavimento, já a deformação elástica deve-se considerar a estrutura como um todo (MOTTA, 1991).

Para prevenir deformações plásticas é necessário que a mistura possua um alto teor de agregados angulosos, baixo teor de ligante e alto teor de vazios. Já para prevenir as deformações elásticas tem que apresentarem um teor de vazios relativamente baixos. Diante disto, pode-se dizer que para garantir a estabilidade-durabilidade da estrutura é preciso compatibilizar o teor ótimo de vazios da mistura (MOTTA,1991).

2.3. Desempenho de pavimentos flexíveis

Os pavimentos devem apresentar desempenho satisfatório em longo prazo, proporcionando ao usuário uma trafegabilidade segura, confortável e econômica (DNIT, 2006b).

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, deste modo é possível definir ações de prevenção e manutenção (GONÇALVES, 1999).

De acordo com o DNIT (2006b), os níveis de serventia de um pavimento são avaliados através das características de desempenho (segurança, conforto e economia). Modelos empíricos são aplicados para estimar a previsão de desempenho de um pavimento, estes modelos permitem quantificar a atenuação do nível de eficiência ou a formação de defeitos ao longo do tempo.

No que se refere aos fatores que influenciam o desempenho dos pavimentos flexíveis, Gonçalves (1999) descreve:

Muitos fatores afetam o desempenho a ser oferecido por um determinado pavimento, dentre estes destacam-se: o número e a magnitude das cargas do tráfego, as propriedades dos materiais componentes das camadas e a sua heterogeneidade ao longo da via, a natureza do solo de subleito, a frequência e as práticas de manutenção aplicadas ao longo do tempo, as condições de drenagem e aspectos ambientais.

Outro aspecto que se refere a desempenho de pavimentos é encontrado na literatura de Branco et al. (2008), o qual ressalta que um pavimento pode ser descrito de acordo com critérios de desempenho, podendo então ser identificado como um pavimento de desempenho funcional ou estrutural.

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

2.4. Mecanismos de degradação de pavimentos flexíveis

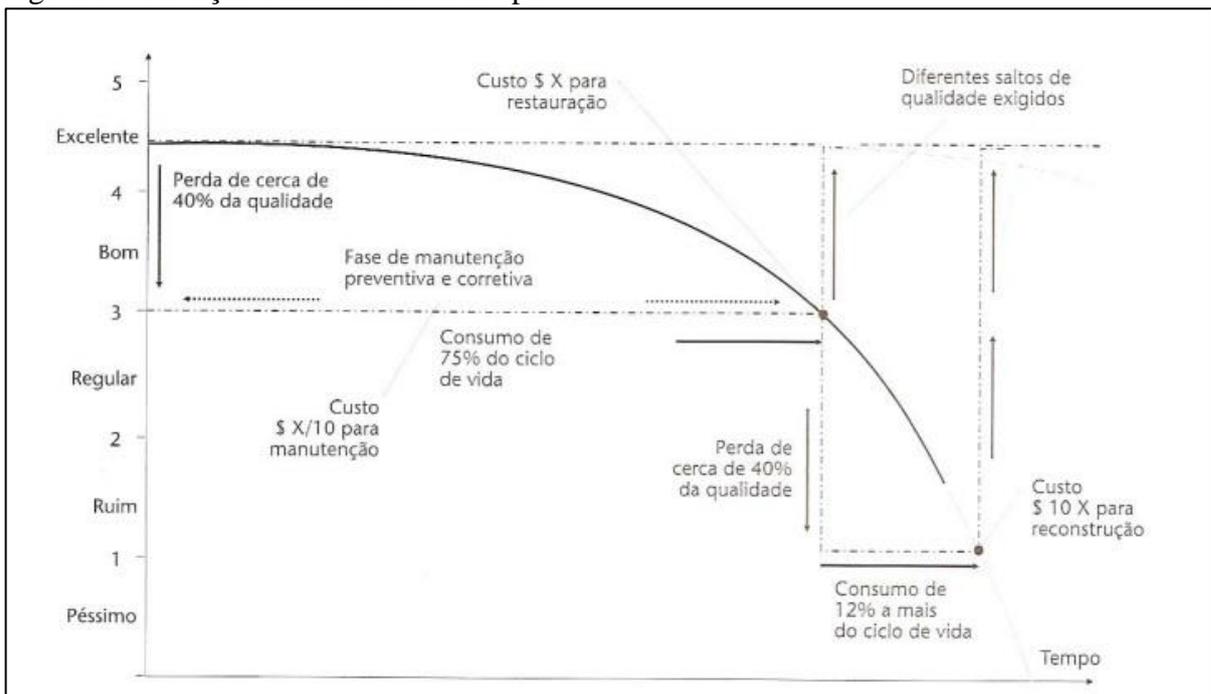
Projetados para durarem um determinado período de tempo, os pavimentos apresentam em sua fase inicial ótimas condições as quais gradativamente vão decrescendo com o passar do tempo até que atinja uma condição ruim. Esse processo de perda de eficiência do pavimento ao longo do tempo é conhecido como deterioração do pavimento (DNIT, 2006b).

No que diz respeito à degradação de pavimentos flexíveis, Specht (2004) afirma que esta está relacionada a inúmeras patologias, dentre as quais, deformações permanentes excessivas e fissuras de fadiga são as principais que surgem devido ao tráfego e a estrutura do pavimento, enquanto, fissuras de retração térmica e desagregação surgem devido a intervenção climáticas e os materiais que compõem o pavimento.

Patologias funcionais relacionadas às irregularidades na superfície do pavimento são assim classificadas por representarem a maior parcela do valor numérico de serventia. No entanto, tais irregularidades podem estar diretamente ligadas com processos de natureza estrutural, como por exemplo, as deformações plásticas (BALBO, 2007).

De modo a exemplificar a variação da serventia ao longo do tempo, na literatura de Balbo (2007), é possível encontrar essa relação de forma sucinta, como apresentada na Figura 5.

Figura 5 - Variação da serventia no tempo



Fonte: Balbo (2007, p. 259)

Para definir equações de desempenho, a AASHO adotou como critério de ruptura por serventia, onde a qualidade no que se refere a rolamento é avaliada em uma escala de zero a cinco (ordenadas), e as abscissas representam o tráfego acumulado ou o tempo decorrido (BALBO, 2007).

O documento “Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis” elaborado pelo DNER, atual DNIT, descreve que se considerarmos um pavimento onde o projeto e a execução sejam satisfatórios, a evolução dos níveis de deflexão durante a exposição às cargas repetidas e ação do meio ambiente podem ser divididas em três fases distintas. A primeira se refere a fase de consolidação, ou seja, logo após a construção, é ao final desta fase que a deflexão tende a estabilizar. A segunda é a fase que sucede a consolidação, classificada como fase elástica, durante esta a deflexão tende a permanecer constante, apenas em alguns casos pode crescer, a vida útil do pavimento pode ser definida nesta fase. A terceira e última fase esta relacionada com o processo de fadiga, é caracterizada por um aumento progressivo no nível de deflexão até que comece a exteriorizar os efeitos de fadiga (trincas, fissuras).

De acordo com Nakahara (2005):

No Brasil, o mecanismo de degradação dominante nas rodovias de tráfego médio ou pesado é o trincamento por fadiga. Nas vias urbanas, os afundamentos plásticos têm sido predominantes quando os pavimentos não atendem às exigências de espessura ou de compactação preconizadas pelos métodos de projeto.

2.5. Tipos de patologias em pavimentos flexíveis

No que se refere à definição de patologias que no decorrer do tempo aparecem em pavimentos flexíveis, a NBR 005/2003_TER do DNIT classifica como:

- Fenda;
- Afundamento;
- Ondulação ou corrugação;
- Escorregamento;
- Exsudação;
- Desgaste;
- Panela ou buraco;
- Remendo.

2.5.1. Fenda

De acordo com DNIT (2006b), as fendas podem ainda ser classificadas como “fissuras” ou “trincas”. Estas são causadas pelos seguintes fatores:

- Tráfego atuante que pelo ciclo de carregamento e alívio promove tensões de tração na fibra inferior do revestimento;
- Alternância da mudança diária de temperatura que causa contrações no revestimento existente;
- Reflexão no revestimento de trincas existentes em bases cimentadas (base de solo-cimento).

Ainda segundo o DNIT (2006b), as fendas são subdivididas em classes: Classe I – trincas com aberturas menores que 1 mm; Classe II- trincas com aberturas maiores que 1mm mas sem erosão na borda; Classe III – trincas com aberturas maiores que 1mm e com erosão na borda.

De acordo com a classificação feita pelo DNIT (2003), a NBR 005/2003_TER estabelece além da classificação uma codificação para identificação das mesmas, a Quadro 1 apresenta essa condição.

Quadro 1 - Classificação e codificação de fendas

FENDAS				CODIFICAÇÃO	CLASSE DAS FENDAS		
Fissuras				FI	-	-	-
Trincas no revestimento geradas por deformação permanente excessiva e/ou decorrentes do fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Transversais	Curtas	TTC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TTL	FC-1	FC-2	FC-3
		Longitudinais	Curtas	TLC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TLL	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas Interligadas	“Jacaré”	Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	J	-	FC-2	-
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	JE	-	-	FC-3
Trincas no revestimento não atribuídas ao fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Devido à retração térmica ou dissecação da base (solo cimento) ou do revestimento		TRR	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas Interligadas	“Bloco”	Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	TB	-	FC-2	-
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	TBE	-	-	FC-3

Fonte: Norma 005 – TER (DNIT, 2003,p.4)

2.5.1.1. Fissuras

As fissuras são as fendas existentes no revestimento, são de pequena abertura e podem estar posicionadas longitudinalmente, transversalmente ou obliquamente ao eixo da via. Estas são somente perceptíveis se o indivíduo estiver posicionado a uma distância inferior 1,5m da fissura (DNIT, 2003).

2.5.1.2. Trincas

As trincas assim como as fissuras também surgem no revestimento, mas com abertura superior. De fácil percepção, essas trincas ainda podem apresentar de maneira isolada ou interligada. Trincas isoladas são classificadas como transversais, longitudinais ou de retração, enquanto as trincas interligadas são classificadas como trinca “couro de jacaré” ou trinca tipo “bloco” (DNIT, 2003).

Trincas em revestimento asfáltico é o modo de degradação mais comum em pavimentos flexíveis, e esta na maior parte das vezes está relacionada à fadiga. O processo de trincamento por fadiga ocorre pela repetição de passagem de veículos de carga, ou seja, pelos esforços repetidos de tração por flexão do revestimento. Estas trincas originam-se na base da camada de revestimento se propagando até a superfície, tendem a surgir longitudinalmente nas trilhas de roda de veículos de carga, ramificam-se com o tempo e passam a ser identificadas como “trincas couro de jacaré”, e a partir destas trincas ramificadas é que são originadas as trincas transversais (FONTES, 2009).

A seguir as Figuras 6 à 9 apresentam alguns desses tipos de trincas:

Figura 6 - Trinca isolada transversal



Fonte: Norma 005 – TER (DNIT, 2003,p.6)

Figura 7 - Trinca isolada longitudinal



Fonte: Norma 005 – TER (DNIT, 2003,p.6)

Figura 8 - Trinca interligada “Couro de Jacaré”



Fonte: Norma 005 – TER (DNIT, 2003,p.7)

Figura 9 - Trinca interligada “Bloco”



Fonte: Norma 005 – TER (DNIT, 2003,p.7)

2.5.2. Afundamento

Deformações plásticas ou permanentes oriundas do revestimento asfáltico ou de camadas subjacentes, incluindo o subleito, os afundamentos são considerados deformações de grande importância (BERNUCCI et al., 2008).

Motta (1991) descreve que as deformações plásticas são originadas pela passagem de carga no pavimento, esse tipo de defeito da origem ao fenômeno conhecido como afundamento na trilha de roda da superfície do pavimento.

As deformações permanentes, ou afundamentos de trilha de roda, são caracterizados por uma depressão longitudinal no pavimento, estas originadas devido a ação da carga dos pneus e ao fluxo de cargas pesadas. Estas deformações permanentes são responsáveis por dois aspectos importantes ao usuário: desconforto e segurança (MATTOS, 2014).

Segundo definição da NBR 005/2003_TER, afundamentos nada mais são do que deformações permanentes que causam depressões na superfície do pavimento. Quando esse afundamento atinge extensões inferiores a 6m é considerado “afundamento plástico local” (Figura 10), quando a extensão excede os 6m e se estiver localizado ao longo da trilha de roda é considerado “afundamento da trilha de roda” (Figura 11) (DNIT, 2003).

Figura 10 - Afundamento Local



Fonte: Norma 005 – TER (DNIT, 2003,p.7)

Figura 11 - Afundamento da Trilha de Roda



Fonte: Norma 005 – TER (DNIT, 2003,p.7)

2.5.3. Ondulação e Corrugação

Bernucci et al. (2008) define corrugações como “deformações transversais ao eixo da pista, em geral compensatórias, com depressões intercaladas de elevações, com comprimento de onda entre duas cristas de alguns centímetros ou dezenas de centímetros”. A Figura 12 apresenta esse tipo de deterioração.

Figura 12 - Ondulação ou Corrugação



Fonte: Norma 005 – TER (DNIT, 2003,p.8)

2.5.4. Escorregamento

Este defeito consiste no descolamento do revestimento em relação à camada subjacente do pavimento, logo após isso, começam a surgir fendas em forma de meia lua na estrutura (NBR 154/2010-ES).

Caracterizado inicialmente pelo aparecimento de trincas em forma de meia lua, estas surgem em pontos que há solicitação de esforços de tração das cargas de roda, com o tempo surge o escorregamento do revestimento deixando expostas as camadas inferiores do pavimento (PACHECO, 2001).

A Figura 13 ilustra o escorregamento do bordo de uma pista de pavimento flexível.

Figura 13 - Escorregamento



Fonte: Norma 005 – TER (DNIT, 2003,p.8)

2.5.5. Exsudação

Patologia localizada na superfície do pavimento, caracterizada pelo excesso de ligante betuminoso na superfície do pavimento. Este tem cor preta brilhosa e reflete que nem um vidro, normalmente surge nas trilhas de roda (PRESTES 2001). A Figura 14 é um demonstrativo desse tipo de defeito

Figura 14 – Exsudação



Fonte: Norma 005 – TER (DNIT, 2003,p.10)

2.5.6. Desgaste

Uma patologia que surge na superfície do pavimento devido a inúmeros fatores, como por exemplo, a ação do tráfego, condições meteorológicas e até mesmo pelos materiais empregados, o ligante asfáltico passa a perder sua capacidade de reter os agregados, estes então soltam-se progressivamente sob a ação das cargas de tráfego (DNIT, 2006b).

Figura 15 – Desgaste



Fonte: Norma 005 – TER (DNIT, 2003,p.10)

2.5.7. Panela ou Buraco

Esse tipo de defeito se caracteriza pelo surgimento de uma depressão na superfície do pavimento, tem como principal causa à má aderência entre as camadas superpostas que compõe o pavimento. A profundidade da panela ou buraco pode atingir as camadas inferiores, provocando a degradação das mesmas (DNIT, 2003). A Figura 16 apresenta esse tipo de patologia.

Figura 16 – Panela ou Buraco



Fonte: Norma 005 – TER (DNIT, 2003,p.10)

2.5.8. Remendo

Para o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER-RS), remendo consiste na aplicação de Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ) com a finalidade de restaurar pontos isolados (panela) na camada de revestimento. Esses pontos devem possuir pequenas extensões (aproximadamente 1m) ou pequenas áreas (aproximadamente 35m²) quando tiverem sofrido descamamento ou arrancamento localizados.

Sejam em estradas ou até mesmo vias urbanas, Massaro (2005) ressalta que os principais serviços de manutenção que geralmente são executados são remendos, selagem de trincas e aplicação de capa selante.

Figura 17 - Remendo



Fonte: Guia Construir (2014)

2.6. Utilização de fibras como material de reforço

Dobbin e Rocha (2011) 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 compósitos é uma alternativa que vem sendo usada a vários anos, inclusive há relatos do antigo Egito o povo da época utilizava palha na argamassa, e na China há indícios do seu uso na construção da muralha da China (DOBBIN; ROCHA, 2011). Porém, seu estudo passou a ser cientificamente explorado apenas nos anos 50 com a entrada das fibras de aço e vidro (TANESI; FIGUEIREDO, 1999).

Em estudo, a utilização de fibras de polipropileno como material de reforço em concreto mostra-se satisfatória, pois além de resultar em peças com melhor acabamento, geram um considerável fator de segurança e ainda as peças ficam livres de indesejadas patologias como a fissuração do concreto (DOBBIN; ROCHA, 2011).

Para Dobbin e Rocha (2011), a utilização das fibras de polipropileno:

Atualmente, vem sendo largamente utilizada para vários setores da construção civil no intuito de gerar propriedades benéficas em termos de segurança aos compósitos. Pode ser na fabricação de telhas, uso em pavimentações, painéis de vedação vertical, dentre outros. Todos com o fim de procurar minimizar deficiências dos compósitos convencionais que não conseguem o desempenho desejado.

É válido ressaltar que muitos estudos têm sido elaborados com a incorporação de fibras ao solo como alternativa ao método de adição de fibras como material de reforço. Com aumento na capacidade de suporte a esforços de tração quando adicionadas ao solo, este apresenta mudanças em alguns parâmetros fazendo com que o método apresenta-se satisfatório, tornando assim as fibras aptas a serem utilizadas nas mais diversas obras de engenharia que necessitam ganho de resistência (TRINDADE et al., 2005).

Segundo Casagrande (2001), a adição de fibras nem sempre está condicionada a aumentar à resistência à tração de materiais suscetíveis a deformações por cisalhamento e a outros problemas derivados do surgimento de tensões. A inclusão das fibras não impede que o material sofra fissuração, mas ela atua no controle da propagação das fissuras, melhorando assim as propriedades do material.

Para Feuerharmel (2000), a utilização de fibras como material de reforço em solos é uma prática nova e promissora, esta é fundamentada na tecnologia de materiais compósitos, onde o intuito é criar um novo material com propriedades específicas através da combinação de dois ou mais materiais.

No que se refere o uso de fibras como material de reforço em pavimentos flexíveis, pode-se dizer que não há muitos estudos explorados. Na verdade, os estudos que existem nessa área é com relação a misturas asfálticas tipo SMA (Stone Matrix Asphalt), essa mistura se caracteriza pela graduação descontínua com cerca de 70-80% de sua constituição de agregados, de 6-7% de ligante e com uma porcentagem aproximadamente 4% de índices de vazios. Esse tipo de mistura leva em sua composição a inclusão de fibras, só que estas nesse caso não servem como material de reforço, mas sim tem a função de “segurar” o ligante dentro na estrutura (BABADOPULOS et al., 2008).

O SMA foi desenvolvido na Alemanha em 1968 devido ao crescente volume de tráfego e conseqüentemente o aumento das solicitações ao pavimento (BERNUCCI et al. 2008). Foi a partir dos anos 90 que o SMA passou a ser utilizado em maior escala, quando foi implantado nos EUA e Canadá, porém no Brasil apenas em 2000 esse estudo foi posto em prática com a primeira camada de revestimento SMA aplicada no autódromo de Interlagos (SINDEAUX FILHO, 2007).

Devido suas características vale ressaltar que o SMA é recomendável para diversos fins de obras de pavimentação, pois esse tipo de mistura se destaca pela elevada resistência ao desgaste, diminuição de ruído a rolamento e altos coeficientes de atrito, proporcionando assim vantagens de segurança, conforto e durabilidade (BERNUCCI et al., 2008).

Para Casagrande (2005), as fibras quando adicionadas a matriz do compósito deve estar perpendicularmente disposta com relação ao plano de ruptura ou fissura, essa distribuição é de extrema importância, pois assim garantirá o aumento de sua capacidade de transmitir cargas e atingindo o máximo de sua capacidade de suporte. No caso da orientação das fibras estarem contrárias ao indicado, elas perdem o efeito. A escolha da fibra dependerá exclusivamente das características da matriz a ser reforçada e das propriedades almejadas do material final. É válido ressaltar que algumas características são fundamentais na escolha do tipo de fibra que será empregado para reforço do material:

- A fibra deve ser quimicamente neutra e não deteriorável;
- Deve estar livre de sofrer ataques de fungos, bactérias ou álcalis;
- Não deve ser prejudicial a saúde humana;

- Além de que, deve apresentar características físicas e mecânicas apropriadas.

Ainda segundo Casagrande (2005), as fibras podem ser classificadas em quatro classes distintas: minerais, metálicas, poliméricas e naturais.

2.6.1. Fibras minerais

No que se refere a fibras minerais como material de reforço, as fibras de vidro e carbono são as que mais têm sido exploradas para estudo.

As fibras de carbono possuem alta resistência à tração e pode ser dividida em duas categorias: fibras com alta resistência, porém com módulo de elasticidade relativamente baixo (em torno de 240 GPa) e fibras com alta resistência e alto módulo de elasticidade (em torno de 420 GPa). Essas propriedades do material tornam iminentes a sua aderência com a matriz (SANTOS, 2004).

As fibras de vidro na atualidade vêm sendo empregadas desde a indústria automobilística, aeronáutica, naval até mesmo no setor da industrial civil. Esse material constitui um dos principais materiais de reforço para matrizes de compósitos graças algumas vantagens, dentre elas pode-se citar: o baixo custo, boa resistência química e a possibilidade de aumento de resistência mecânica (SANTOS, 2006).

2.6.2. Fibras metálicas

No que diz respeito as fibras metálicas, a que tem ganhado mais destaque em estudos como material de reforço são as fibras de aço. Quando utilizadas na construção civil, estas possuem fator de forma na faixa de 30 a 50, comprimento que varia de 0,1 a 7,62 cm e diâmetro entre 0,13 e 0,9 mm (SANTOS, 2004).

Para Figueiredo (2000), as fibras de aço podem ser classificadas como fibras de alto módulo, não são destinadas somente a redução de fissuras e ao aumento da capacidade de suporte, mas também são capazes de propiciar um ganho de desempenho quanto ao reforço mecânico. Quando adicionadas ao concreto, elas agem pós-fissuração do mesmo, proporcionando uma redução na velocidade da propagação das fissuras.

2.6.3. Fibras Sintéticas ou Poliméricas

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

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

2.6.3.1. Fibras de polipropileno

De baixo custo as fibras de polipropileno se destacam sobre as outras, possuem características específicas graças a sua cadeia polimérica que afeta diretamente na resistência e comportamento. Dentre suas características é válido ressaltar que o polipropileno é um material inodoro, incolor e atóxico, com densidade de 900 Kg/m^3 (FÉLIX, 2002).

No estudo elaborado por Casagrande (2005) usando fibras de polipropileno como material de reforço em solos apresentaram resultados satisfatórios. A adição influenciou diretamente os parâmetros do solo, aumentando a resistência ao cisalhamento de pico e pós-pico, seu efeito na inclusão é mais eficiente para baixas tensões efetivas médias iniciais, menores diâmetros, maiores comprimentos e teores de fibras.

2.6.4. Fibras naturais

Para Magalhães (2005), muitas das fibras naturais quando usadas como materiais de reforço podem atingir altas resistências, como exemplo as fibras de bambu que podem atingir resistências na ordem de 100MPa e módulo de elasticidade entre 10 e 25 GPa.

Santos (2006) ressalta:

Vários estudos têm sido realizados sobre as aplicações das fibras de sisal, juta e coco em compósitos reforçados, podendo-se citar os de Joseph et al. (1992), Toledo Filho et al. (1997) e Heitzmann et al. (2001), voltados para analisar em especial a melhoria das propriedades físicas e mecânicas dos compósitos, quando reforçados com fibras vegetais.

As fibras naturais possuem uma série de vantagens sobre as sintéticas, dentre elas podem ser citadas: grande abundância, baixo custo, conservação de energia, são biodegradáveis e possuem baixa densidade. Porém, algumas desvantagens precisam ser

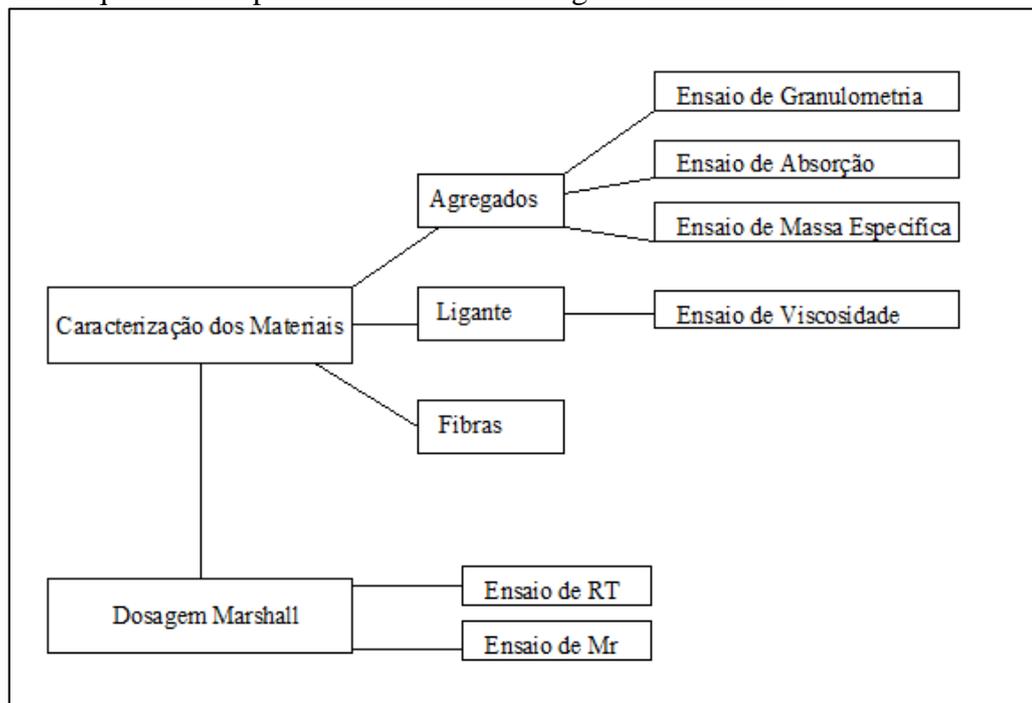
ressaltadas, como por exemplo, a baixa durabilidade quando usado como reforço em matriz cimentícia, a variabilidade de propriedades e também a fraca adesão em seu estado natural (SALES, 2011).

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo são apresentados os métodos e materiais utilizados para avaliar o comportamento de misturas asfálticas convencionais e misturas asfálticas com adições de fibras de polipropileno.

A Figura 18 apresenta a esquematização dos procedimentos metodológicos que foram realizados para a obtenção dos objetivos do estudo.

Figura 18- Sequência dos procedimentos metodológicos realizados.



Fonte: Elaboração própria.

3.1. Caracterização dos materiais

3.1.1. Agregados

Os agregados chegam a representar até 95% do peso da mistura e influenciam diretamente no comportamento mecânico da mesma. São responsáveis pela formação da estrutura pétreo necessária para resistir às cargas oriundas do tráfego, daí a importância de caracterizá-los e analisá-los previamente antes de fazer as misturas.

Os agregados estudados neste trabalho são provenientes de doação feita pela pedreira Pedra Rosada, que fica situada próxima a BR-290 no município de Alegrete,RS.

A Figura 19 apresenta o material doado para estudo pela pedreira já no Campus da Unipampa-Alegrete.

Figura 19 – Agregados



Fonte: Elaboração própria

3.1.1.1. Ensaio de Granulometria dos Agregados

O ensaio granulométrico do material tem por objetivo identificar a faixa de enquadramento da amostra ensaiada, de acordo com as especificações do DNIT.

Duas amostras dos distintos agregados depositados atrás do laboratório de Engenharia Civil do Campus da Unipampa-Alegrete foram coletadas, colocadas para secar em estufa e passaram pelo processo de análise granulométrica. O ensaio foi executado conforme a norma DNER-ME 083/98 de Análises Granulométricas, utilizando peneiras de malha quadrada e de aberturas regulamentadas conforme especificações normativas.

A Figura 20 apresenta os materiais preparados para serem ensaiados e a Figura 21 representa a forma como o ensaio foi executado com o devido equipamento e o Quadro 2 apresenta a faixa granulométrica aceitável pelo DNIT para projeto.

Figura 20- Materiais ensaiados



Fonte: Elaboração própria.

Figura 21- Ensaio de Análises Granulométricas



Fonte: Elaboração própria.

Quadro 2 - Faixas Granulométricas

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 1/2"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
3/4"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
1/2"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Fonte: Norma DNIT 031/2006 p.5

As peneiras utilizadas no ensaio dos agregados minerais virgens de diferentes graduações, são normalizadas pela DNER-ME 035/95, a partir disto foi possível determinar a quantidade de cada graduação de agregados que compõe a mistura. Os agregados ensaiados foram Brita 1, Brita 0 e pó de pedra.

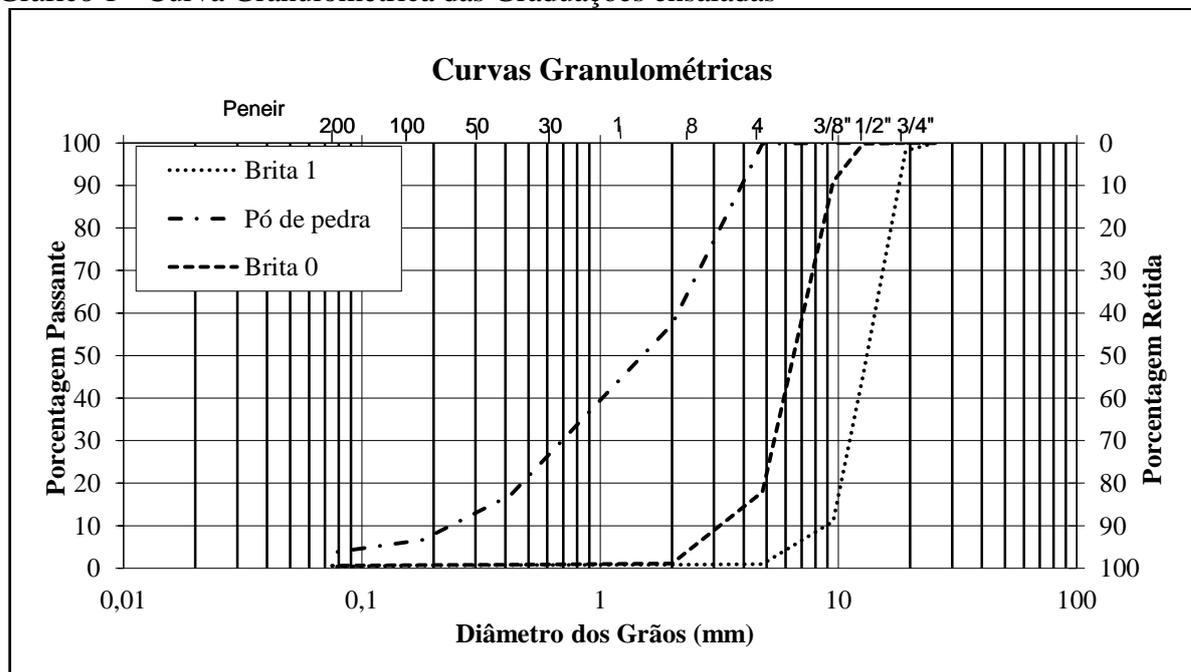
A Tabela 1 indica o percentual passante das amostras em cada peneira e o Gráfico 1 indica a curva granulométrica de cada graduação apresentada.

Tabela 1 - Ensaio Granulométrico, percentual passante de material

PENEIRAS		% Passante		
Aberturas (mm)	Nº	Pó de Pedra	Brita 0	Brita 1
25	1"	100	100	100
19	3/4"	100	100	98,22
12,5	1/2"	100	99,84	45,39
9,5	3/8"	100	90,91	11,06
4,75	4	99,8	17,97	0,93
2	10	57,32	1,15	0,85
0,42	40	17,17	0,8	0,81
0,18	80	6,66	0,74	0,68
0,075	200	3,68	0,57	0,36
Fundo	-	0	0,04	0,07

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 1 - Curva Granulométrica das Graduações ensaiadas



Fonte: Elaboração própria

As amostras de Brita1, Brita 0 e pó de pedra tentaram ser enquadradas dentro da distribuição granulométrica da faixa “B” ou “C” do DNIT, porém devido a deficiência na quantidade de finos nos materiais não foi possível realizar o enquadramento em nenhuma das faixas, portanto, para a realização da pesquisa foi necessário separar os agregados em

peneiras, para que o excesso de algumas frações fosse desprezado e uma curva granulométrica fosse criada de forma a obedecer limites das curvas de trabalho propostas pelo DNIT.

Na Figura 22 são apresentados os materiais já separados e a Tabela 2 apresenta a composição estipulada para a mistura.

Figura 22- Agregados com a granulometria separada para a composição da mistura.



Agregados peneira N200 e Fundo



Agregados peneira N10 e N40

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2: Composição de agregados na mistura.

PENEIRAS		MATERIAIS		
Aberturas (mm)	Nº	Cada Dosagem (g)	Total Dosagem (g)	Percentual na Mistura (%)
25	1"	-	-	-
19	3/4"	-	-	-
12,5	1/2"	300	3900	5
9,5	3/8"	600	7800	10
4,75	4	3000	39000	50
2	10	960	12480	16
0,42	40	390	5070	6,5
0,18	80	270	3510	4,5
0,075	200	210	2730	3,5
Fundo	-	270	3510	4,5

Fonte: Elaboração própria.

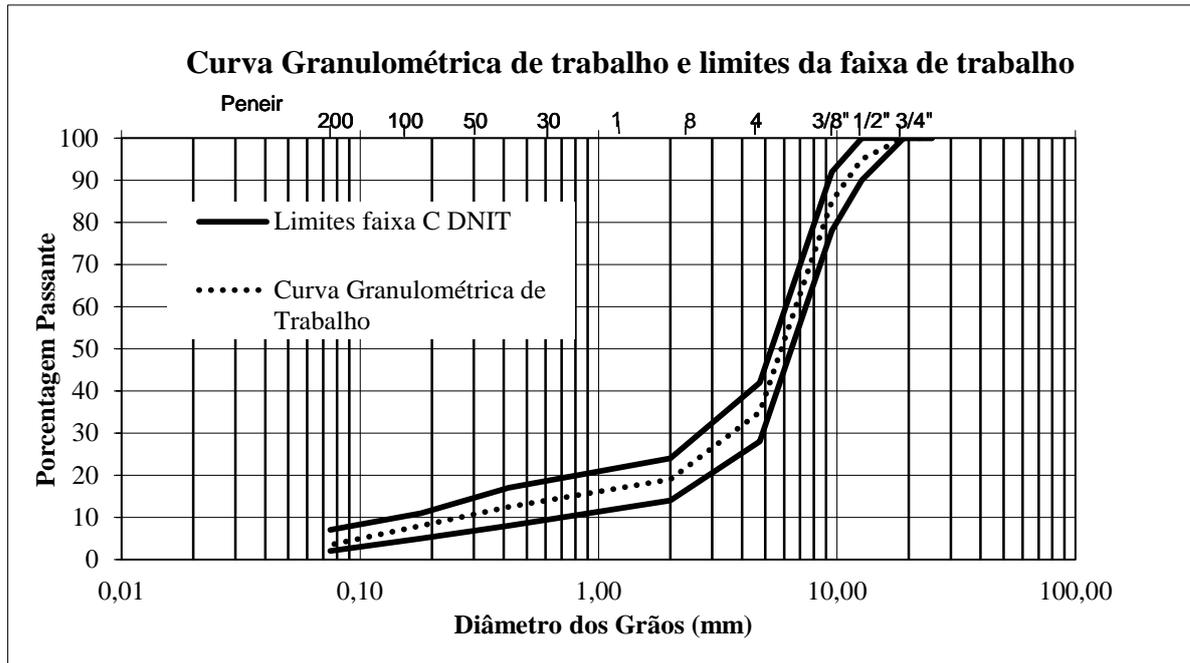
A composição da mistura pode ser analisada na Figura 23. Diante da composição estipulada para fins de projeto, o Gráfico 2 apresenta a curva de trabalho da mistura, a qual está dentro dos limites propostos pela “FAIXA C” do DNIT. Para facilitar o enquadramento dos materiais dentro da faixa granulométrica, e visto que os materiais apresentavam deficiência de material fino, foi utilizado 2% de cal hidratada CH-II de origem dolomítica.

Figura 23- Composição da mistura



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 2 – Curva Granulométrica de Trabalho / Faixa “C” do DNIT



Fonte: Elaboração própria

3.1.2. Ligante

O ligante asfáltico que foi utilizado na mistura é o CAP 50/70 da Petrobrás. Para fins de estudo algumas características do produto são apresentadas no quadro 3.

Quadro 3: Características do CAP 50/70.

Ponto de fusão	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: Elaboração própria.

A Figura 24 é a representação de uma amostra de ligante asfáltico que foi utilizado para fins de estudo.

Figura 24 – Ligante Asfáltico



Fonte: Elaboração própria

3.1.2.1. Ensaio de Viscosidade

No Brasil, o ensaio de viscosidade segue as normativas da DNER-ME 004/94 através do viscosímetro Saybolt-Furol e tem por finalidade a determinação de resistência ao fluxo do ligante.

A viscosidade também pode ser obtida através do método rotacional, que utiliza o equipamento conhecido como viscosímetro Brookfield. Deste modo, a viscosidade medida é a razão entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de cisalhamento de um líquido, esta razão também é conhecida como coeficiente de viscosidade dinâmica.

Portanto, para a análise da trabalhabilidade do material foi executado o ensaio de viscosidade no laboratório da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) através do viscosímetro de Brookfield, também conhecido como viscosímetro rotacional. Através deste ensaio, foi possível obter as temperaturas para bombeamento, mistura e compactação do CAP, ambas as temperaturas são apresentadas na tabela 3.

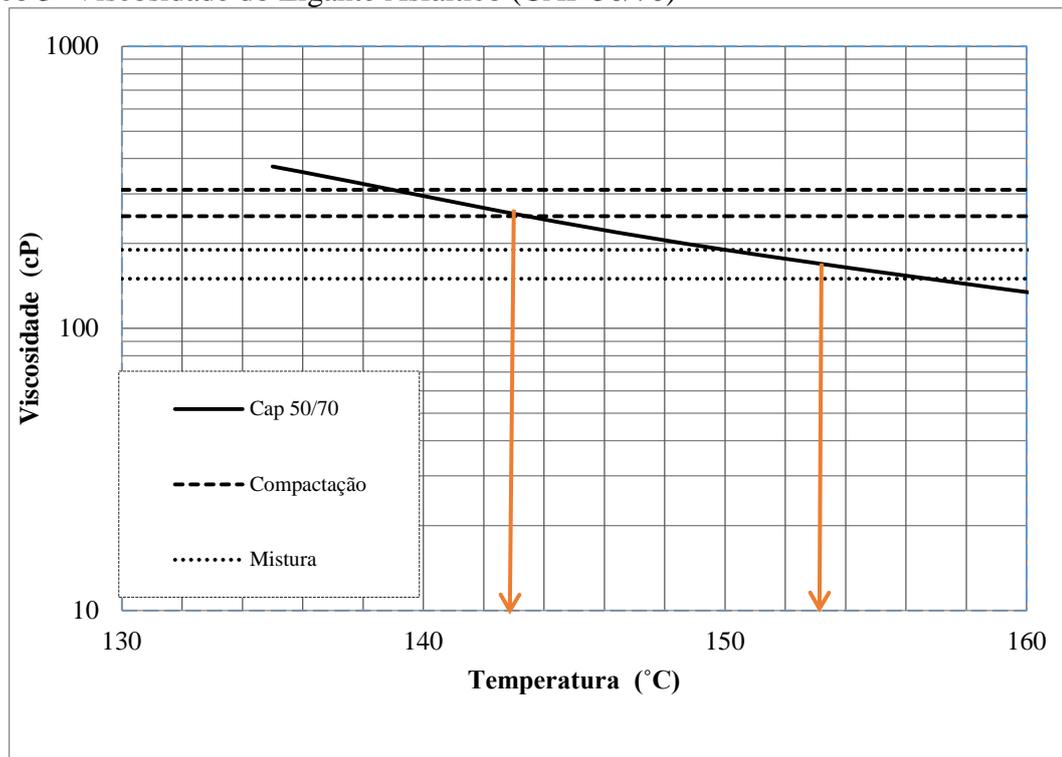
Tabela 3: Ensaio de viscosidade do CAP 50/70.

	Viscosidade (cP)			Mistura	Compactação
	375	190	77,5		
Temperatura (°C)	135°C	150°C	177°C	153-154	142-143

Fonte: Elaboração própria.

O resultado do ensaio pode ser melhor analisado no gráfico 3.

Gráfico 3- Viscosidade do Ligante Asfáltico (CAP 50/70)



Fonte: Elaboração própria

3.1.3. Fibra de Polipropileno

Para as misturas asfálticas com reforço de fibras, foram usadas as fibras de polipropileno, estas estão disponíveis no mercado em forma de pequenos filamentos. As propriedades e a justificativa da escolha dessa fibra para fins de estudo já estão citadas na fundamentação teórica. Nesta pesquisa foram utilizadas fibras de polipropileno comercializadas pela empresa Macaferri do Brasil Ltda.

Foram utilizadas para fins de estudos fibras com 24 mm de comprimento e com diâmetro de 18 μm . Vale ressaltar ainda as principais propriedades deste material:

- Densidade- 900 Kg/m^3
- Módulo de Elasticidade- entre 5 e 7 KN/mm^2
- Resistência à Tração- entre 0,5 à 0,75 KN/mm^2
- Alongamento na Ruptura- 8% (SARZALEJO et al., 2009).

A Figura 24 apresenta as fibras que foram utilizadas na pesquisa.

Figura 25 – Fibra de Polipropileno



Fonte: Elaboração própria

3.2. Dosagem Marshall

No Brasil a dosagem Marshall é regulamentada pela norma DNER-ME 043/95, este método foi elaborado na segunda guerra mundial e ainda é utilizado até os dias atuais (BERNUCCI et al., 2008).

Em síntese, para o estudo o procedimento do método Marshall consistiu inicialmente por compactação a quente, compactar uma série de corpos-de-prova (CP) com a mistura de agregado e ligante asfáltico para a mistura convencional e, agregados, ligante asfáltico e fibra de polipropileno para a mistura reforçada. Ambas as misturas foram compactadas dentro de moldes cilíndricos metálicos que depois foram respectivamente armazenados ao ar livre. Por fim, depois de decorridas 24 horas do armazenamento os corpo-de-prova foram desmoldados.

Como esse estudo é pioneiro não foi possível encontrar referências de fibras em misturas asfálticas, portanto no que diz respeito ao teor de fibras, foi estipulado que seria adotado 0,5% de fibras, esse valor muitas vezes é adotado como referência em estruturas de concreto convencional, e outros valores maiores tentaram ser adicionados, porém em misturas asfálticas as fibras de polipropileno por apresentarem grande volume quando “soltas” dificultava a mistura dos materiais.

A Figura 26 apresenta a sequência de como foi realizada a mistura com adição de fibras e a moldagem dos CPs.

Figura 26- Moldagem dos Corpos de Prova.



Fonte: Elaboração própria.

Para a obtenção dos parâmetros de dosagem (massa específica aparente, massa específica máxima teórica e volume de vazios) os corpos de prova foram medidos e pesados.

3.2.1. Massa Específica Aparente (GMB)

Para obtenção da massa específica aparente da mistura compactada (GMB) o ensaio foi realizado de acordo com a normativa do DNIT 117/2010. Onde esse parâmetro está diretamente relacionado com a razão entre a massa seca do corpo de prova e a massa seca do corpo de prova posteriormente submerso em água. Para o calculo foi utilizada a seguinte equação:

$$GMB = \frac{M_s}{M_{ss} - M_{ss\ sub}} * 0,9971 \quad \dots (1)$$

Onde:

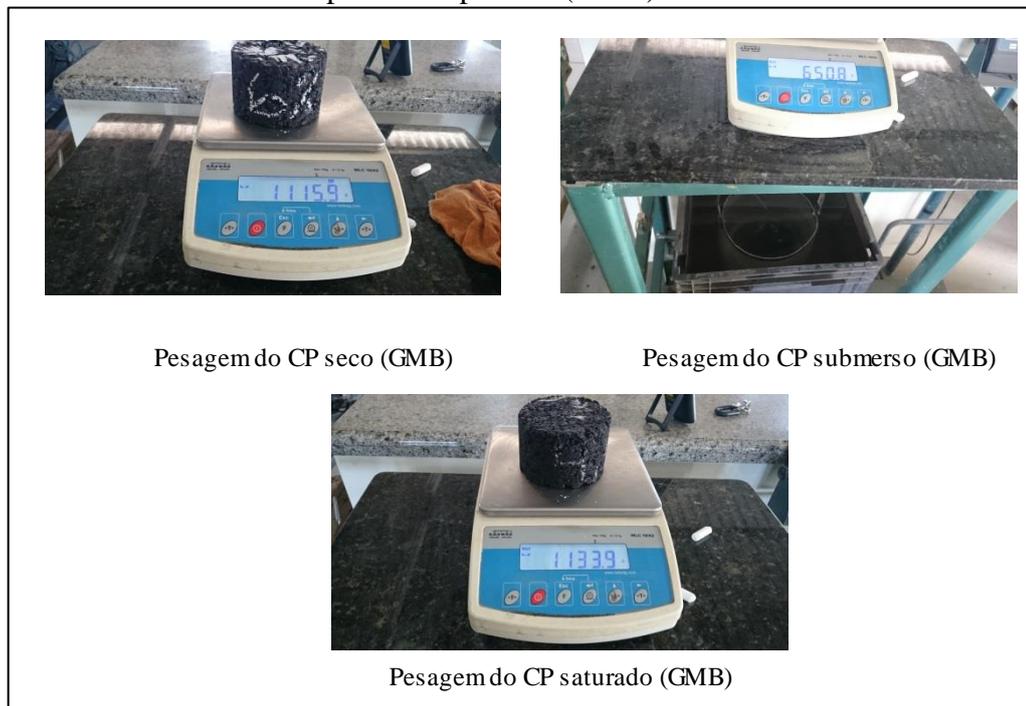
M_s é a massa do corpo de prova seco;

M_{ss} é a massa do corpo de prova na condição de superfície saturada seca;

$M_{ss\ sub}$ é a massa do corpo de prova submerso.

A Figura 27 apresenta a sequência em que o ensaio foi realizado.

Figura 27 – Ensaio de Massa Específica Aparente (GMB).



Fonte: Elaboração própria.

3.2.2. Massa Específica Máxima (GMM)

Esse parâmetro foi determinado através de ensaio realizado em laboratório, o qual é normatizado pela ASTM D 2041 (2000), AASHTO T 209 (1999) ou por método europeu EM 12697-5.

O procedimento de ensaio iniciou-se com a pesagem de 1500g da mistura, a qual foi colocada em um recipiente de massa já conhecida e posteriormente preenchido com água até que toda a mistura ficasse submersa. Após o recipiente foi submetido a aplicação de pressão de vácuo por um período de aproximadamente 15 minutos, isso para que o ar existente entre os agregados recoberto com ligante fosse retirado. Por fim, o recipiente retorna a pressão ambiente e é completado com água e posteriormente pesado novamente.

Para o cálculo do GMM foi utilizada a seguinte equação:

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

Onde:

A, representa a massa da amostra seca em ar;

B, representa a massa do recipiente com volume de água;

C, representa a massa do recipiente + amostra submersa em água;

A Figura 28 apresenta uma sequência dos procedimentos do ensaio de massa específica máxima (GMM) que foi realizado.

Figura 28- Procedimentos de ensaios de Massa Específica Máxima (GMM).



Fonte: Elaboração própria.

3.2.3. Volume de Vazios x Teor Ótimo de Ligante

O teor de ligante asfáltico pode estar relacionado com todos os parâmetros calculados, porém para a escolha do teor que será utilizado nas camadas de rolamento de um pavimento asfáltico é primordial que este seja baseado apenas com o volume de vazios (V_v), o qual deve corresponder a 4%.

Para obtenção desse parâmetro, segue a equação que foi utilizada.

$$V_v = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad \dots (3)$$

Onde:

G_{mm} é a massa específica máxima da mistura;

G_{mb} é a massa específica aparente da mistura;

3.2.4. Procedimentos Metodológicos para Realização do Estudo

As moldagens dos corpos-de-prova foram realizadas no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete. Para a obtenção dos parâmetros do material ensaiado a quantidade de CPs confeccionados está apresentada na Tabela 4.

Portanto, foram moldados 12 CPs para cada mistura.

- Mistura Asfáltica Convencional- 12 CPs;
- Mistura Asfáltica com adição de 0,5% de fibras de Polipropileno- 12 CPs;

Os cilindros metálicos onde os CPs foram moldados tem dimensões de ϕ 10 cm e h 15cm.

3.3. Ensaios Mecânicos

Para caracterização mecânica das amostras, foi definido que seria executado ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral e ensaio de Módulo de Resiliência. Posteriormente, os resultados foram comparados entre si, e analisados se atendem o que já é predefinindo, na tentativa de evitar os principais tipos de defeitos.

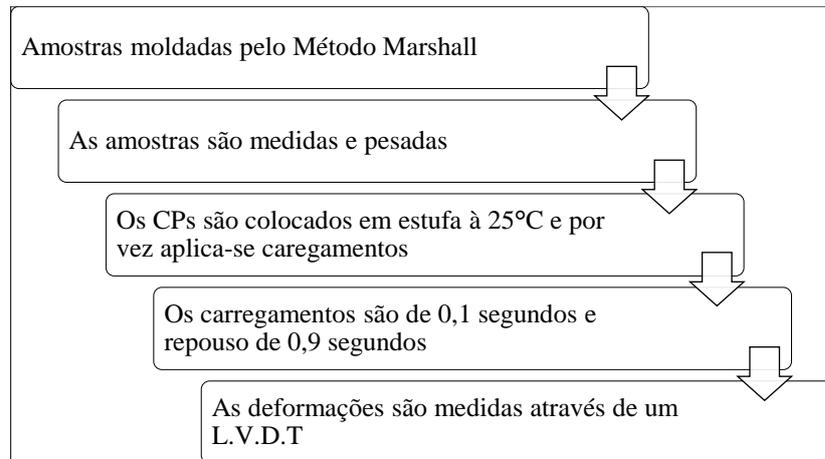
3.3.1. Ensaio de Módulo de Resiliência

Este ensaio é definido como sendo a razão entre a tensão de tração e a correspondente deformação específica recuperável, quando as misturas são submetidas neste caso a carregamentos cíclicos e de baixa duração (ROHDE, 2007). Com este ensaio obtém-se o parâmetro de rigidez da mistura, esse é de tal importância, pois possibilita fazer uma análise do comportamento mecânico da mesma.

No Brasil o ensaio é normatizado pelo DNIT 135/2010 ME e o equipamento utilizado é composto por uma estrutura metálica, um pistão que gera carregamentos cíclicos pulsantes com o auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1 Hz. O equipamento funciona dentro de uma câmara com temperatura controlada, isso permite ensaios em diversas temperaturas (SPECHT, 2004).

A partir disto, o módulo de resiliência (M_r) é medido a partir do carregamento dinâmico aplicado, com tempo de 0,1s e 0,9s de repouso. A amostra sofre deformações horizontais, e estas são medidas através de em LVDT (Linear Variable Differential Transducer), ligado a um microcomputador. O ensaio é realizado em duas direções, após a execução a amostra é rotacionada 90° e o ensaio é novamente realizado. A Figura 29 é uma síntese do passo à passo do ensaio que foi realizado.

Figura 29 – Sequência do ensaio de Mr.



Fonte: Elaboração própria.

Este ensaio foi conduzido no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria - Campus Santa Maria e a temperatura de execução foi de 25°C.

A equação para determinar o módulo de resiliência é dada:

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

Onde,

Mr= módulo de resiliência;

P= carga aplicada;

Δ = deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição da carga;

h=altura do corpo-de-prova;

μ = coeficiente de Poisson (0,30);

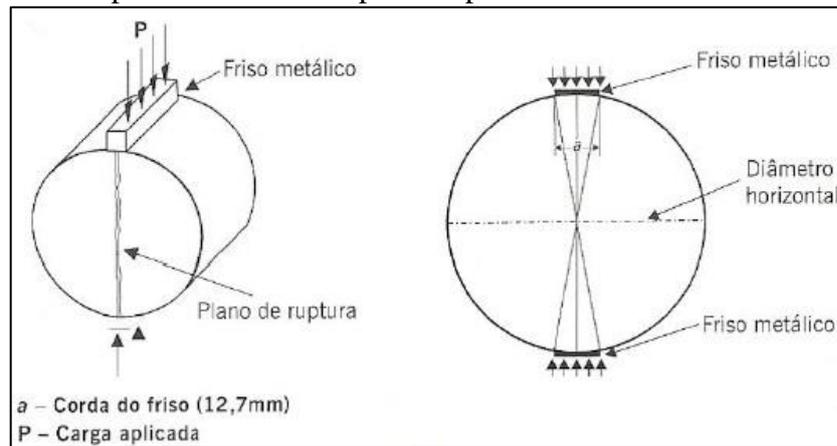
3.3.2. Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Para a determinação da resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de concreto asfáltico, no Brasil, o ensaio é regulamentado pela norma DNIT 136/2010 ME e este consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de dois planos paralelos. As tensões de tração são obtidas através do diâmetro horizontal, perpendicularmente à carga, tendo assim como medida resultante a resistência à tração (RT).

Para a realização do ensaio em misturas asfálticas é necessário posicionar o corpo de prova no equipamento com o auxílio de dois frisos metálicos com 12,7mm de espessura, sob os quais é aplicada a força. Os frisos metálicos não influenciam no cálculo da RT.

A Figura 30 apresenta uma simulação de como é o plano de ruptura por compressão diametral.

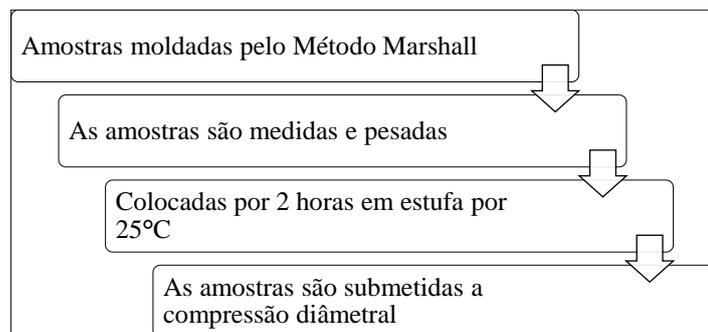
Figura 30- Plano de ruptura das amostras por compressão diametral



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

A Figura 31 é uma esquematização sequencial de como foi realizado o ensaio.

Figura 31 - Sequência de ensaio de RT



Fonte: Elaboração própria.

Para o estudo, o ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete. Este ensaio pode ser desenvolvido com o corpo-de-prova com temperatura variando entre 25°C a 60°C, porém nesta pesquisa, o ensaio foi realizado a uma temperatura de 25°C, para isso os CPs foram armazenados em estufa à 25°C e retirados minutos antes da execução do ensaio.

As Figuras 32 à 36 são uma sequência da realização do ensaio.

Figura 32- Armazenamento dos CPs em estufa à 25°C



Fonte: Elaboração própria.

Figura 33- Exemplo de realização do ensaio em um equipamento



Fonte: Elaboração própria.

Figura 34- Corpos de prova convencionais já rompidos.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 35- Posicionamento do CP com adição de fibras no equipamento.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 36- CP com adição de fibras após a realização do ensaio



Fonte: Elaboração própria.

A carga estática a qual o CP foi submetido durante o ensaio tinha velocidade de 0,8mm/s e a equação utilizada para o cálculo da RT é dada a seguir:

$$RT = \frac{2P}{(\pi \cdot \phi \cdot h)} \quad \dots(5)$$

Onde:

P= Força aplicada;

Φ = Raio do corpo-de-prova;

h = Altura do corpo-de-prova;

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse tópico serão apresentados e analisados os resultados provenientes da caracterização volumétrica, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência na tentativa de distinguir a mistura asfáltica convencional da mistura asfáltica com adição de fibras de polipropileno no que diz respeito ao comportamento mecânico.

4.1. Caracterização Volumétrica da Mistura

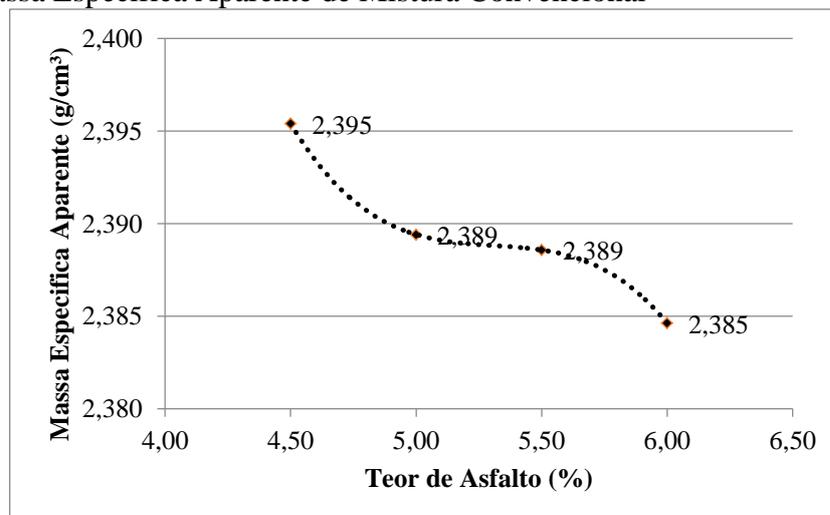
O Quadro 4 apresenta a relação dos resultados obtidos após a realização do ensaio de Massa Específica Aparente (Gmb) detalhado no item 3.2.1 da metodologia, os mesmos foram calculados conforme a equação 1. Os gráficos 3 e 4 apresentam esses valores para uma melhor análise.

Quadro 4- Massa Específica Aparente (GMB).

Mistura Convencional		Mistura Com Fibras	
Teor de Ligante (%)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Teor de Ligante (%)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)
4,5	2,3954	5,5	2,3246
5,0	2,3894	6,0	2,3656
5,5	2,3886	6,5	2,3003
6,0	2,3846	7,0	2,2949

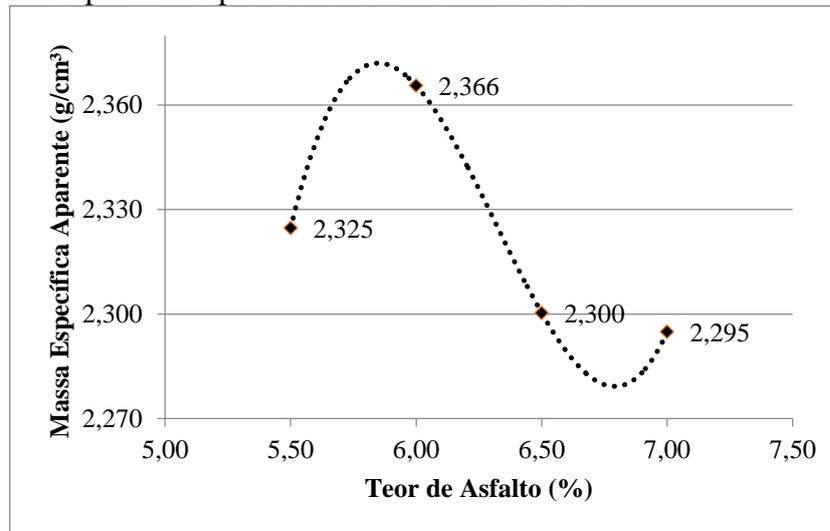
Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 4- Massa Específica Aparente de Mistura Convencional



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 5- Massa Específica Aparente de Mistura com Fibras



Fonte: Elaboração própria.

Já o Quadro 5 apresenta a relação dos resultados obtidos após a realização do ensaio de Massa Específica Máxima (Gmm) da mistura. A sequência do ensaio é descrita no item 3.2.2 da metodologia e a equação 2 foi utilizada para obtenção deste parâmetro.

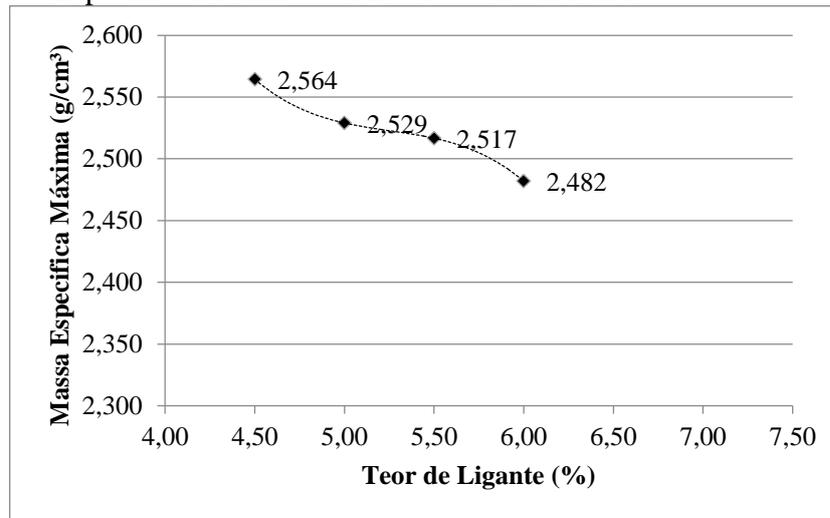
Quadro 5- Massa Especifica Máxima (GMM).

Mistura Convencional		Mistura Com Fibras	
Teor de Ligante (%)	Massa Específica Máxima (g/cm³)	Teor de Ligante (%)	Massa Específica Máxima (g/cm³)
4,5	2,5644	5,5	2,4814
5,0	2,5290	6,0	2,4649
5,5	2,5167	6,5	2,3945
6,0	2,4820	7,0	2,3662

Fonte: Elaboração própria.

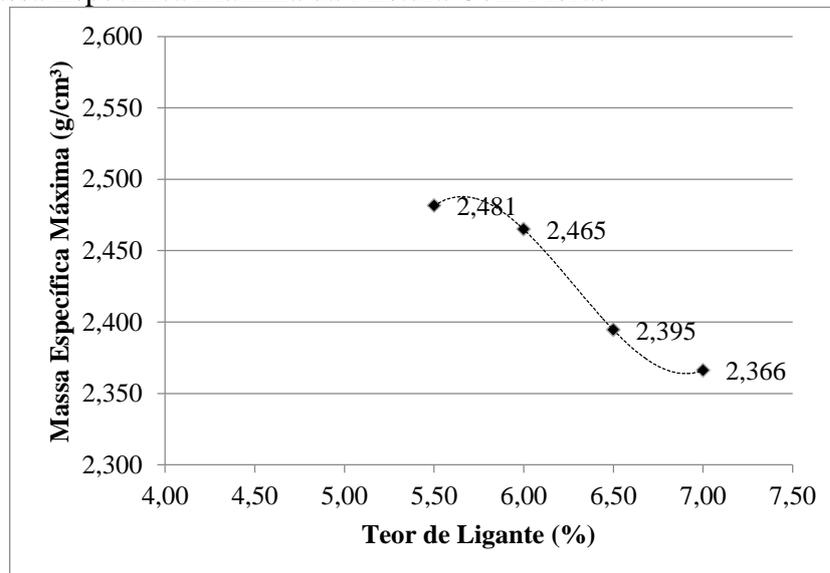
Os gráficos 6 e 7 apresentam esses valores para uma melhor compreensão.

Gráfico 6- Massa Específica Máxima da Mistura Convencional



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 7- Massa Específica Máxima da Mistura Com Fibras



Fonte: Elaboração própria.

De posse dos resultados dos ensaios Gmb e Gmm foi possível a obtenção do Volume de Vazios da mistura. O Gmb foi obtido com base na média de 3 CPs de cada teor de ligante e o Gmm a partir da média de duas amostras de cada teor de ligante.

Os quadros 6 e 7 apresentam os valores de Volume de Vazios de cada teor de ligante. Já os gráficos 8 e 9 apresentam a relação entre o volume de vazios e o teor de ligante das misturas a fim de definir o teor ótimo já especificado no item 3.2.3 da metodologia.

Quadro 6- Volume de Vazios Mistura Convencional

Teor de Ligante (%)	GMM (g/cm ³)	GMB (g/cm ³)	Volume de Vazios
4,50%	2,564	2,395	0,066
5,00%	2,529	2,389	0,055
5,50%	2,517	2,389	0,051
6,00%	2,482	2,385	0,039

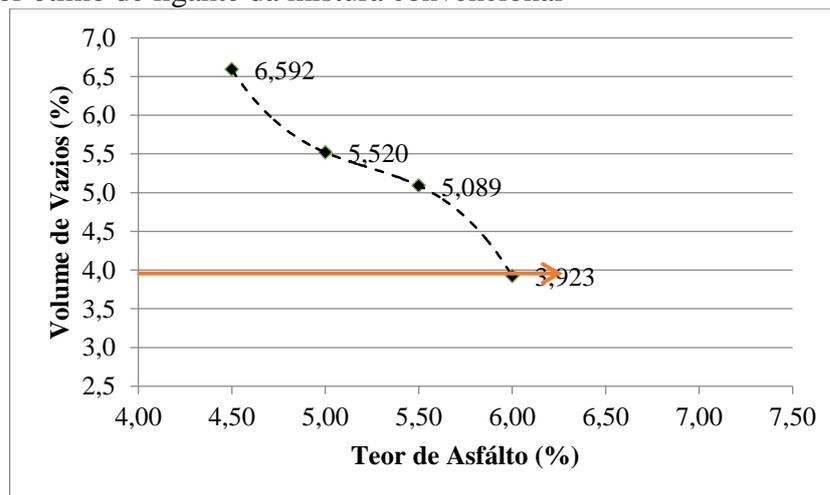
Fonte: Elaboração própria.

Quadro 7- Volume de Vazios Mistura com Fibras

Teor de Ligante (%)	GMM (g/cm ³)	GMB (g/cm ³)	Volume de Vazios
5,50%	2,481	2,325	0,063
6,00%	2,465	2,366	0,040
6,50%	2,395	2,300	0,039
7,00%	2,366	2,295	0,030

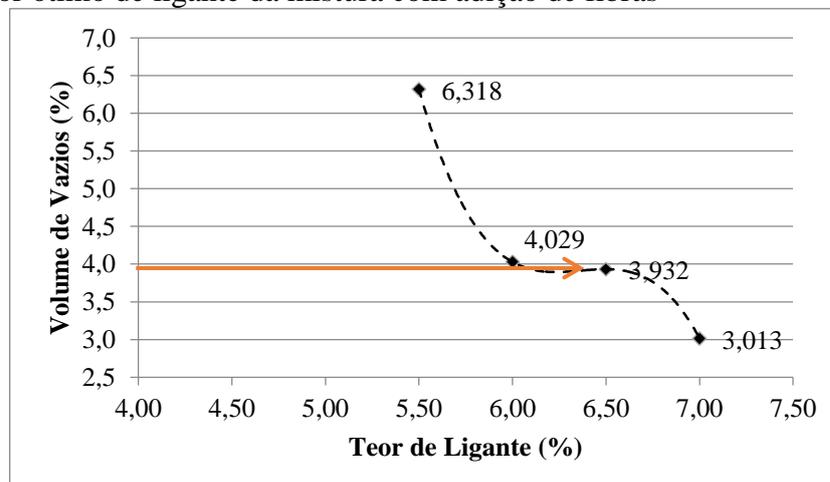
Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 8- Teor ótimo de ligante da mistura convencional



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 9- Teor ótimo de ligante da mistura com adição de fibras



Fonte: Elaboração própria.

Pode-se observar que o teor ótimo de ligante da mistura convencional corresponde a aproximadamente 6% e na mistura com adição de fibras fica entre 6% e 6,5%. Essa diferença de provável 0,5% de ligante entre as misturas se dá pelo fato que as fibras tendem a “sugar” parte do ligante.

4.2. Caracterização Mecânica das Misturas

Para um melhor comparativo e avaliação do comportamento entre a mistura convencional e a mistura com adição de fibras, por critério foi definido que a realização dos ensaios de RT e de Mr seriam realizados com todos os teores de ligante.

Inicialmente para avaliação do comportamento mecânico das misturas asfálticas foi realizado o ensaio de Módulo de Resiliência, detalhado no item 3.4. A equação 4 foi utilizada para o cálculo desse parâmetro, os quais são apresentados no Quadro 8 e 9.

Quadro 8- Resultado do Módulo de Resiliência na Mistura Convencional

Módulo de Resiliência (Convencional)			
CP	Ligante (%)	RT (MPa)	RT (MPa)
1	4,5	3261	3097
2	4,5	3097	
3	4,5	2538	
4	5,0	2248	3453
5	5,0	3453	
6	5,0	3702	
7	5,5	3967	3967
8	5,5	4645	
9	5,5	3550	
10	6,0	2872	3084
11	6,0	3084	
12	6,0	3135	

Fonte: Elaboração Própria.

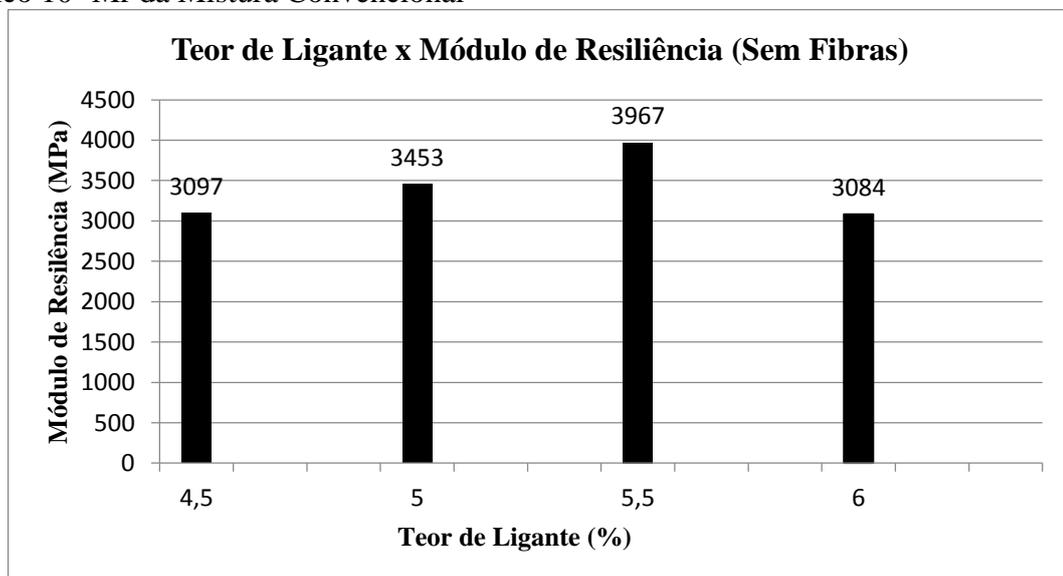
Quadro 9- Resultado do Módulo de Resiliência na Mistura Com Fibras

Módulo de Resiliência (Com Fibras)			
CP	Ligante (%)	RT (MPa)	RT (MPa)
13	5,5	1402	1402
14	5,5	1364	
15	5,5	1645	
16	6,0	2454	2183
17	6,0	2049	
18	6,0	2183	
19	6,5	2656	2656
20	6,5	2545	
21	6,5	2731	
22	7,0	2412	2360
23	7,0	2360	
24	7,0	2360	

Fonte: Elaboração Própria.

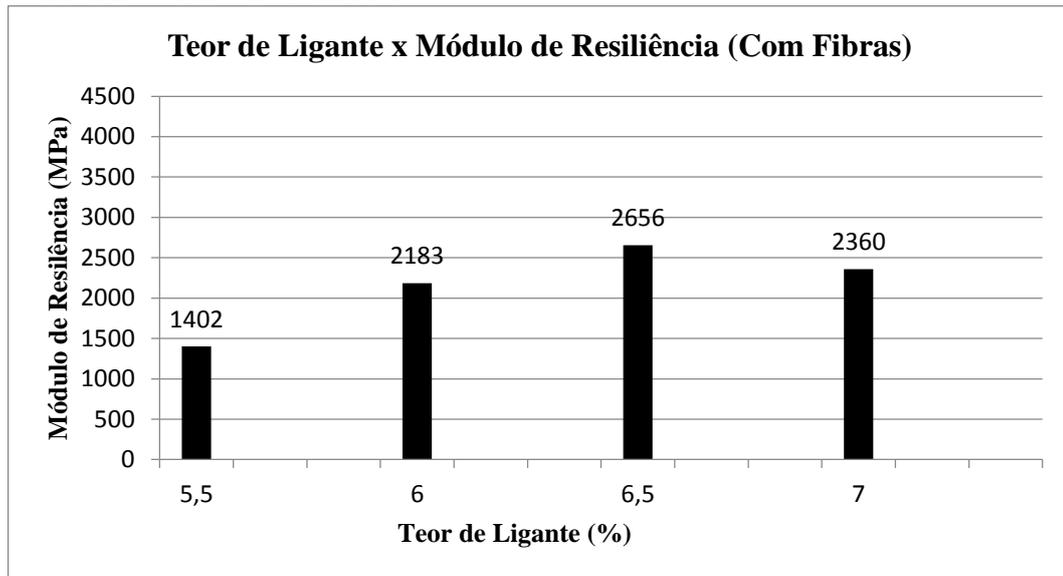
Os gráficos 10 e 11 apresentam uma análise mais detalhada dos resultados obtidos.

Gráfico 10- Mr da Mistura Convencional



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 11- Mr da Mistura com Fibras



Fonte: Elaboração própria.

O que se pode observar com os resultados é que na mistura convencional o Módulo de Resiliência equivale à 3084 MPa, um valor relativamente maior do que na mistura com adição de fibras, onde o mesmo fica em torno de 2183MPa e 2656Mpa, essa análise foi tomada por base ao teor ótimo de ligante da mistura, visto que na realidade é este o teor de ligante que será utilizado para produzir as misturas. Essa diferença entre ambas as misturas se dá pelo fato de que as fibras tentem a absorver parte do ligante, porém não são saturadas, ou seja, forma-se uma espécie de capa em torno da fibra deixando-a impermeável mas com vazios dentro de sua estrutura onde se encontra parte de ar aprisionado. Essa diferença já pode ser observada nos Gráficos 6 e 7, onde a massa específica máxima da mistura com adição de fibras já é menor. Diante disso, pode-se afirmar que as fibras quando incorporadas à mistura asfáltica fazem com que a mesma perca um pouco da rigidez.

No que diz respeito ao ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral, conforme descrito no item 3.3 da metodologia. A seguir os Quadros 10 e 11 apresentam os resultados obtidos à partir da realização do ensaio de RT, os quais foram calculados conforme a equação 5.

Quadro 10- Resultados do ensaio de RT na mistura convencional

Resistência à Tração por Compressão (Convencional)			
CP	Ligante (%)	RT (MPa)	RT (MPa)
1	4,5	1,574	1,437
2	4,5	1,437	
3	4,5	1,281	
4	5,0	1,535	1,629
5	5,0	1,629	
6	5,0	1,865	
7	5,5	1,192	1,271
8	5,5	1,336	
9	5,5	1,271	
10	6,0	1,012	1,141
11	6,0	1,141	
12	6,0	1,368	

Fonte: Elaboração própria.

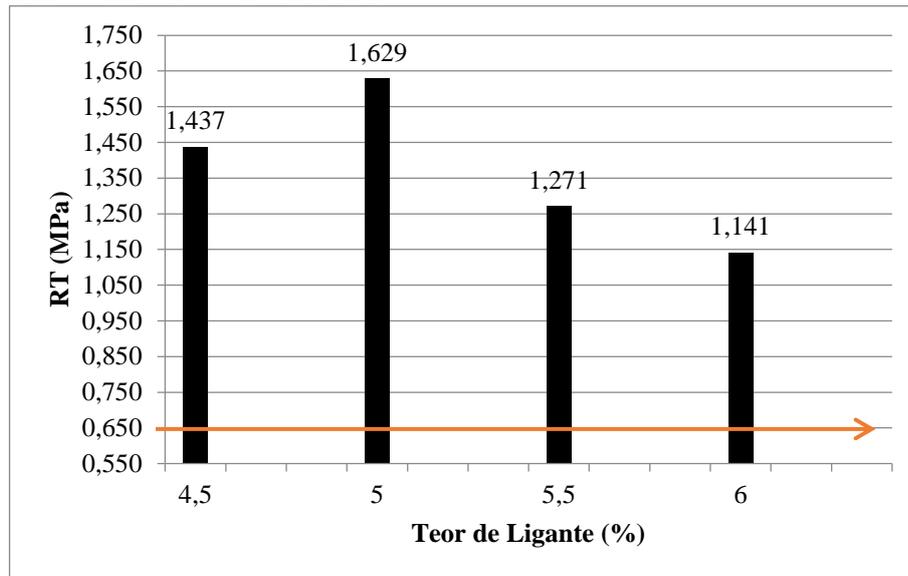
Quadro 11- Resultados do ensaio de RT na mistura com fibras

Resistência à Tração por Compressão (Com Fibras)			
CP	Ligante (%)	RT (MPa)	RT (MPa)
13	5,5	0,656	0,643
14	5,5	0,630	
15	5,5	0,643	
16	6,0	1,157	1,012
17	6,0	0,979	
18	6,0	1,012	
19	6,5	0,917	1,108
20	6,5	1,108	
21	6,5	1,374	
22	7,0	1,320	1,253
23	7,0	1,253	
24	7,0	1,175	

Fonte: Elaboração própria.

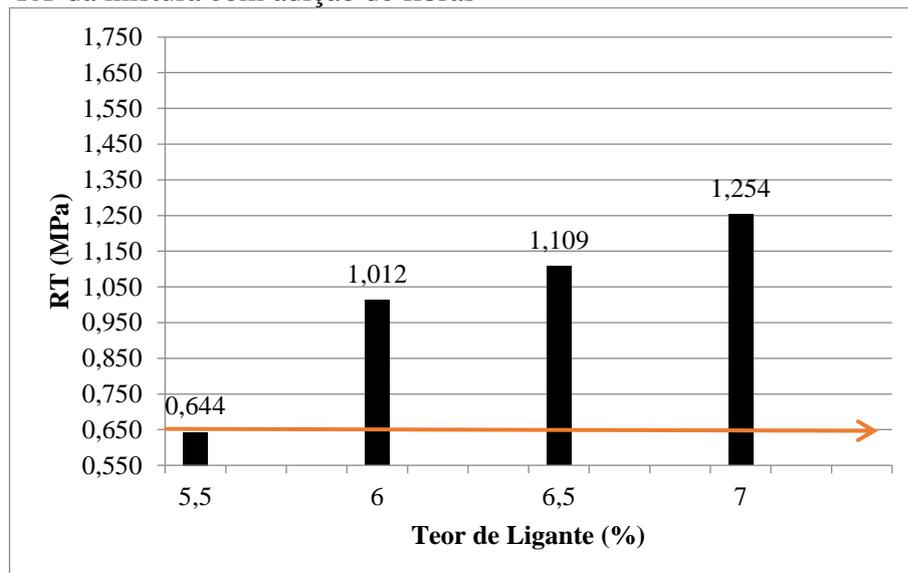
Os gráficos 12 e 13 apresentam os resultados para uma melhor análise.

Gráfico 12- RT da mistura convencional



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 13- RT da mistura com adição de fibras



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com as normativas estabelecidas pelo DNIT 136/210 os valores de RT encontrados no ensaio não deveriam ser inferiores a 0,65 Mpa.

No projeto de mistura convencional, que pode ser observado no Gráfico 12, para critérios de análise o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado com todos os teores de ligante, porém o real valor que se deve considerar é de 1,141 MPa o qual corresponde ao teor ótimo de projeto. Mesmo tendo que considerar o menor valor de RT encontrado como sendo o de projeto, a justificativa se dá pelo fato que para a escolha do teor ótimo (4% de volume de vazios) a norma leva em consideração outros parâmetros como,

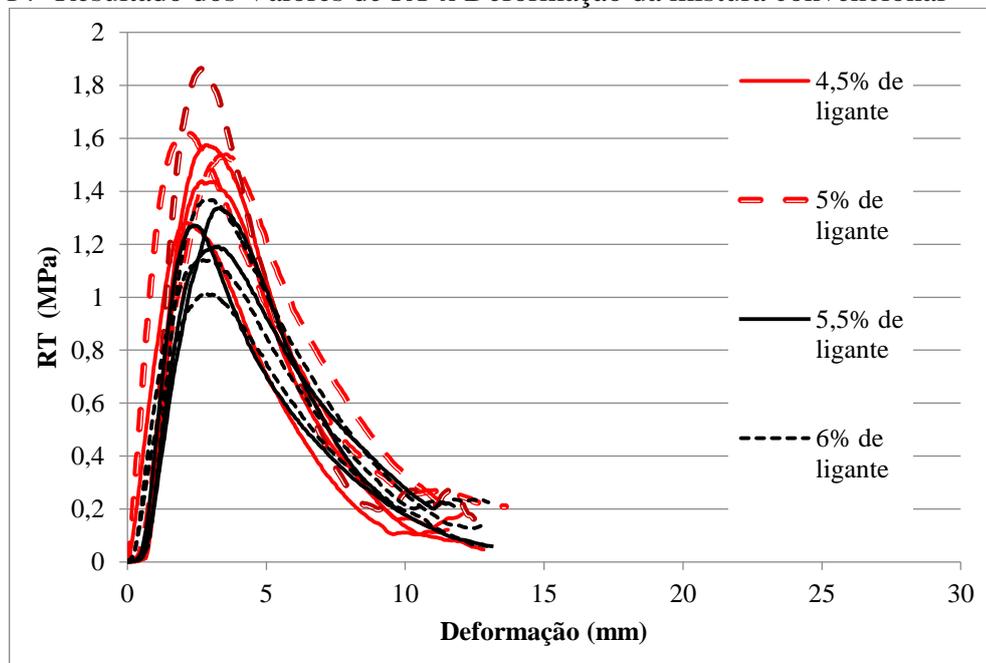
adevidade, estabilidade Marshall, deformação permanente, que não foram analisados nesse estudo.

No caso da mistura com adição de fibras (Gráfico 13), os critérios de análise foram os mesmos, podendo-se afirmar que o valor de RT para projeto nesse caso fica entre 1,012 MPa e 1,109MPa. De todos os teores analisados, o que se pode observar que apenas na mistura com adição de fibras, com o teor de ligante de 5,5% esse valor de RT foi inferior ao recomendado por norma, o mesmo explica-se pelo fato de que o teor de ligante na amostra era muito baixo, não permitindo aderência entre todos os materiais que compõe a matriz da mistura.

Por fim, num comparativo entre os valores de RT de projeto encontrados para ambas as misturas, é válido salientar que em termos de grandeza a diferença entre ambas é relativamente baixa, estando as duas dentro do valor predefinido por norma. Apenas no que se refere ao teor de ligante, a mistura com adição de fibras necessitou de um pouco menos do que 0,5% a mais do que a convencional, isso se deve ao fato das fibras absorverem parte do ligante dentro da matriz.

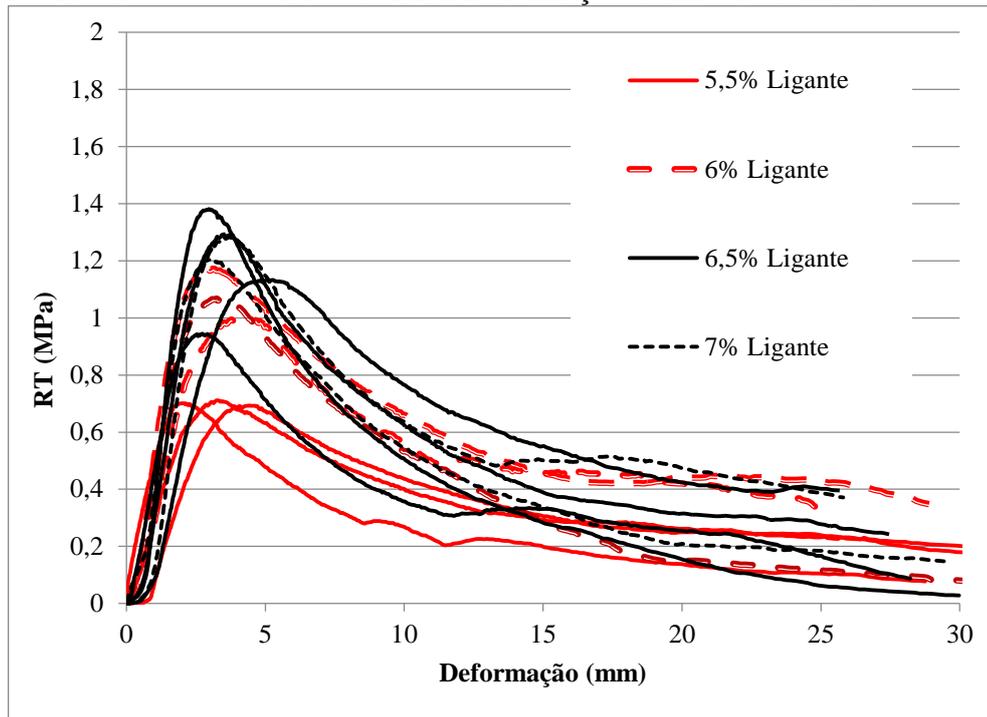
Os valores de RT de todos os corpos de prova podem ser graficamente representados em função da deformação, conforme os Gráficos 14 e 15.

Gráfico 14- Resultado dos Valores de RT x Deformação da mistura convencional



Fonte: Elaboração própria.

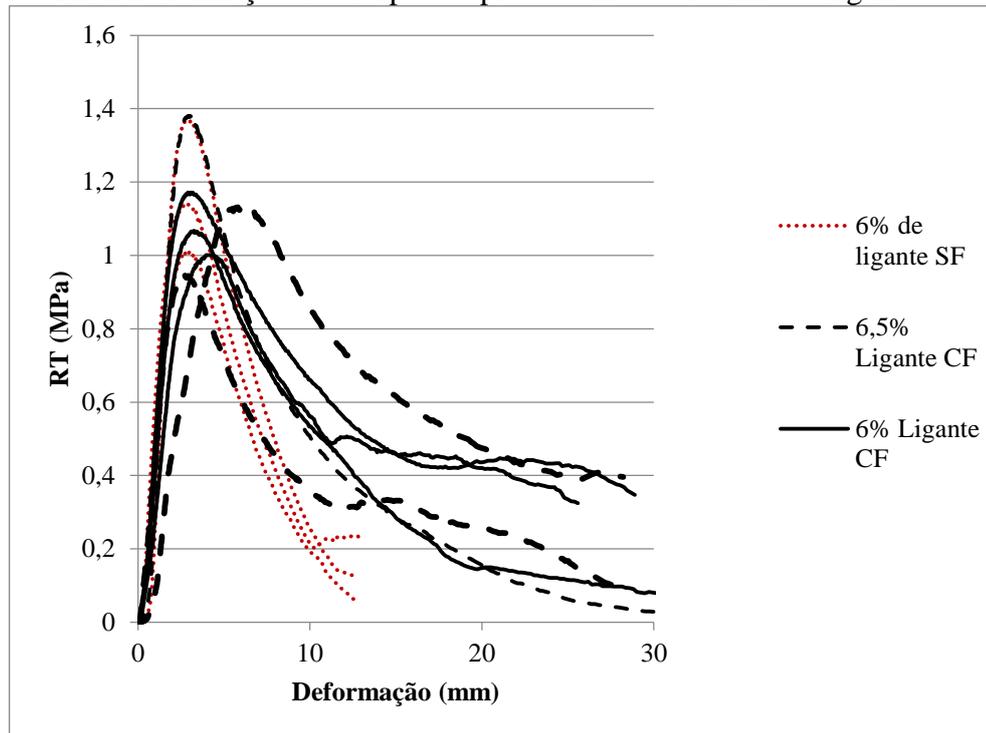
Gráfico 15- Resultado dos Valores de RT x Deformação da mistura com fibras



Fonte: Elaboração própria.

Separadamente, para uma melhor análise, no Gráfico 16 apresenta apenas os valores de RT dos corpos de prova com o teor ótimo de ligante, o qual na mistura com adição de fibras foi considerado o 6% e o 6,5% de ligante, pois o teor ótimo está entre esses dois valores e para mistura sem fibras o teor ótimo de 6%.

Gráfico 16- RT x Deformação dos corpos de prova com o teor ótimo de ligante



Fonte: Elaboração própria

Nos gráficos 14 e 15 o que se pode observar comparando as misturas nos diferentes teores de ligante, é que na mistura asfáltica convencional a resistência de pico é relativamente um pouco maior, porém a mistura com adição de fibras suporta maiores deformações sem que haja separação do corpo de prova, isso pode ser observado melhor no gráfico 16, onde com 30mm de deformação a mistura asfáltica com adição de fibras ainda suporta consideráveis carregamentos, já na mistura convencional essa deformação não chega à 10mm.

A Figura 37 mostra o corpo de prova da mistura asfáltica com adição de fibras suportando deformações sem que haja a ruptura total do material, na configuração como a amostra se encontra o ensaio foi parado visto que começou a ser observada uma compressão da amostra ensaiada por limitações da prensa utilizada.

Figura 37- Corpo de prova de mistura asfáltica com adição no ensaio de RT



Fonte: Elaboração própria.

5 CONCLUSÕES E SUJESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Analisando as características obtidas das misturas estudadas, pode-se dizer que a adição de fibras à misturas asfálticas como material de reforço é eficaz, porém outros ensaios com as misturas devem ser realizados para comprovar se o comportamento das fibras continuarão a viabilizar seu uso.

Para realização do estudo, foi proposta a análise de duas misturas, uma com dosagem convencional e outra com 0,5% de adição de fibras de polipropileno, ambas atendendo os requisitos predefinidos por norma na composição.

Posteriormente foram verificadas as características volumétricas de ambas, com isso é válido ressaltar que a mistura convencional apresentou maiores valores de massa específica máxima, necessitando assim menor teor de ligante, isso se dá pelo fato de que as fibras são apenas envoltas pelo ligante e seu interior apresenta ar, deixando assim também a mistura com o volume de vazios maior.

Após as análises do ensaio de módulo de resiliência, pode-se concluir que as fibras podem sim ser introduzidas à mistura asfáltica mantendo a mesma dentro dos padrões já estudados. Como fonte para essa afirmativa, na literatura de Araujo et.al (2008) misturas convencionais estudadas apresentaram valor de módulo de resiliência em torno de 2982 MPa. Quando comparadas com a mistura convencional a mesma apresenta uma redução na rigidez da composição, isso se dá pelo fato das fibras reduzirem a rigidez da mistura. Como sugestão para a escolha do teor ótimo de ligante, 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.

Diante do exposto, mesmo sem analisar todos os parâmetros (estabilidade, adesividade, vida de fadiga...) necessários para caracterizar as misturas, pode-se afirmar que a adição de fibras de polipropileno à mistura asfáltica contribui positivamente, pois suporta maiores deformações num período de tempo com tensões mais baixas que às de pico, porém consideráveis.

Como o foco do estudo era avaliar a viabilidade do uso da fibra como material de reforço na matriz da mistura asfáltica, pode-se afirmar que a mesma contribui para retardar os defeitos oriundos de fadiga, o qual é explicado no item 2.5.1.2 da revisão bibliográfica. Como referência para tal afirmativa, é válido ressaltar que segundo Balbo (2007), o fenômeno de fadiga ocorre pelas sucessivas solicitações de níveis de tensão inferiores às de ruptura, isso faz

com que aos poucos a estrutura interna perde suas características iniciais ocasionando assim um processo de microfissuração que posteriormente irá resultar na ruptura do material.

5.1. Sugestão para trabalhos futuros

Como esse estudo com adição de fibras em mistura asfáltica convencional é pioneiro, como sugestão para trabalhos futuros, seria importante que outros parâmetros fossem analisados para caracterizar e diferenciar a mistura convencional da mistura com adição de fibras, como por exemplo:

- Realizar ensaios de adesividade e de vida de fadiga;
- Avaliar a utilização de diferentes tipos de ligante;
- Utilizar outros teores de fibras de polipropileno e de diferentes comprimentos. Até mesmo utilizar outros tipos de fibras;
- Realizar pequenos trechos experimentais e acompanhar ao longo do tempo de sua utilização para verificar o seu desempenho quando solicitado ao trafego real.
- Realizar misturas em usina asfáltica, para verificar se o processo de incorporação das fibras seria eficaz na prática.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, P.C; VALE A.C; SOARES J.B; CASAGRANDE M.D.T. In: 19º ENCONTRO DE ASFALTO, 2008, Rio de Janeiro. **Análise laboratorial do cimento asfáltico de petróleo – cap 30/45 – em misturas asfálticas**, Ceará, 2008.p.5

BABADOPULOS L.F.A.L; VALE A.C; SOARES J.B; LOPES M.M; CASAGRANDE M.D.T. In: 19º ENCONTRO DE ASFALTO, 2008, Rio de Janeiro. **Análise do escoamento em misturas asfálticas do tipo sma com fibras de polipropileno**, Ceará, 2008.p 1.

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

BERNUCCI, L.D. et al. **Pavimentação Asfáltica- Formação Básica para Engenheiros**. 1ed. , Rio de Janeiro, RJ, 2008.

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

CASAGRANDE E.G. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de polipropileno e com adição de cinza volante: estudo do desempenho em pavimentos de concreto**. Trabalho de conclusão de curso- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CASAGRANDE M.D.T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. Dissertação (Pós graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CASAGRANDE, M.D.T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CNT- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Atlas do Transporte**, 2006. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Paginas/Atlas-do-Transporte.aspx>> . Acesso em 22 out. 2014.

_____. **Relatório Geral 2004**. Disponível em:<<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/edicoes.aspx?origem=1>>. Acesso em 09 out 2014.

_____. **Relatório Geral 2012**. Disponível em:<<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/edicoes.aspx?origem=1>>. Acesso em 09 out 2014.

_____. **Pesquisa CNT de Rodovias 2014.** Disponível em:< http://www.cnt.org.br/Paginas/Pesquisas_Detalhes.aspx?p=3>. Acesso em 16 out 2014.

_____. **Excesso de carga representa risco para condutores e reduz vida útil do asfalto.** Disponível em:< http://www.cnt.org.br/Paginas/Agencia_Noticia.aspx?n=9501>. Acesso em 10 out 2014.

DAER-RS - DEPARTAMENTO AUTONOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Remendo Superficial** (Recomposição Localizada de Revestimento Betuminoso). Disponível em: <[file:///C:/Users/Usuario/Downloads/arquivo23_28%20\(1\).pd](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/arquivo23_28%20(1).pd)>. Acesso em 20 dez.2014.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis.** Disponível em: < <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-PRO010-79.pdf>>. Acesso em 18 dez.2014.

_____. DNER-ME 004/94. **Material Betuminoso, determinação da viscosidade Saybolt – Furol a alta temperatura método da película delgada,1994.**

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

_____. DNER-ME 083/98. **Agregados-Análise Granulométrica,1998.**

_____. DNER-ME 035/95. **Peneiras de malha quadradas para análise granulométrica de solos, 1995.**

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. **Histórico do Rodoviário,** 2014. Disponível em:<<http://www1.dnit.gov.br/historico/>>. Acesso em 15 out. 2014.

_____. NBR 154/2010 – ES. **Pavimentação asfáltica – Recuperação de defeitos em pavimentos asfálticos** - Especificação de serviço, 2010.

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

_____.DNIT 117/2010 – **Mistura betuminosa – Determinação da densidade aparente,** 2010.

_____. DNIT 136/2010 ME. **Pavimentação Asfáltica - Misturas Asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral-Método de ensaio**, 2010.

_____. DNIT 135/2010 ME. **Pavimentação Asfáltica - Misturas Asfálticas - Determinação do módulo de resiliência-Método de ensaio**, 2010.

_____. **Manual de Pavimentação**, 2006a.

_____. **Manual de Restauração de Pavimentos Flexíveis**, 2006b.

DOBBIN E.S.J; ROCHA L.F.S. **Estudo de concreto com adição de fibra de polipropileno para controle de fissuração**. Trabalho de Conclusão de Curso - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade da Amazônia, 2011.

FÉLIX, A.H. **Compósitos de polipropileno com fibras de vidro utilizando viniltrimetoxisilano como agente de adesão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,2002.

FEUERHARMEL M.R. **Comportamento de solos reforçados com fibra de polipropileno**. Tese (Pós-graduação em Engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

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

FRANCO, F.A.C.P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – sispav**. Tese (Programa de pós-graduação em Engenharia)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. Tese(Doutorado)- Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

GONÇALVES, F.P. **O desenvolvimento dos pavimentos flexíveis**. 1999. Disponível em: < <http://usuarios.upf.br/~pugliero/arquivos/09.pdf>>. Acesso em 17 dez. 2014.

GUIA CONTRUIR. **Falhas no asfalto geram R\$ 1 mi em multas na 116**, 2014. Disponível em: < <http://guia.ppg.br/tag/rodovias>> Acesso em 27 dez.2014.

OLIVEIRA, L.A.J. **A influência das fibras de aço e das adições minerais no enrijecimento à tração do concreto armado: análise experimental.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

MAGALHÃES, M.A. **Resistência ao arrancamento de grampos com fibras de polipropileno.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MASSARO, L.C. **Planejamento da Execução de Remendos em Vias Urbanas Sob o Enfoque da Logística de Serviços.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil)- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2005.

MATTOS, J. R. G. **Monitoramento e análise de pavimentos flexíveis da ampliação da Rodovia BRS-290/RS- A implantação do projeto rede temática de asfalto do Rio Grande do Sul.** Tese (Doutorado em Engenharia)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2014.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos.** 2 ed, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Investigação e Desenvolvimento em Mecânica dos Pavimentos na COPPE-Brasil.** Programa de Engenharia Civil- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MOMM, L.; BARRA, B. S.; OTTO, G.G.; GUERRERO, Y.A. In: 1º International Seminar of Weigh in Motion, 2011, Florianópolis, SC. **Solicitação de carga em movimento no pavimento em concreto asfáltico,** Santa Catarina, 2011, p.4

MOTTA, L.M.G. **Método de dimensionamento de Pavimentos Flexíveis: Critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** Tese (Pós-Graduação em Engenharia)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991.

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

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

PETROBRÁS. **Nossa História,** 2014. Disponível em: <http://www.petrobras.com/pt/quem-somos/nossa-historia/>>. Acesso em 12 out 2014.

PRESTES, M.P. **Métodos de Avaliação Visual de Pavimentos Flexíveis- Um Estudo Comparativo.** Tese (Mestrado)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

ROHDE, L. **Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos.** Tese (Doutorado)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SALES, K.C.S. **Melhoria de solos por inclusão de fibras naturais.** Tese (Mestrado)- Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

SANTOS, A.P.S. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra sob compressão confinada com medição lateral.** Tese (Mestrado)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SANTOS, A. M. **Estudo de compósitos híbridos polipropileno / fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia.** Tese (Mestrado)- Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SARZALEJO, A.G. et al. **Manual Técnico: Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto.** Macaferri do Brasil Ltda., 2009.

SINDEAUX FILHO, C. M. **Estudo do Efeito de Diferentes Granulometrias no Comportamento de Misturas Asfálticas Descontínuas Tipo SMA.** 143 fl. Dissertação (Mestrado), Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

SPECHT, L. P. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus.** 2004. 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.

TRINDADE, T.P.; IASBIK, I.; LIMA, D.C.; BUENO, B.S; MINETTE,E. **Latossolo vermelho-amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória: estudo realizado com amostras de grandes dimensões.** REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 2005.

VALE, A.C.; CASAGRANDE, M.D.T.; SOARES, J.B. **Viabilidade das fibras de coco em misturas asfálticas do tipo sma seguindo metodologia superpave**. Tese (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2007.

VASSOLER,G.;CHONG,W.;SPECHT,L.P. **Comportamento mecânico de pavimentos flexíveis submetidos a gradientes térmicos**. Tese (Pós graduação)- Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2011.