

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUCAS DELLAGLIO LOPES

**ANÁLISE DOS EFEITOS DE FIBRAS DE CAPIM ANNONI NA ADESIVIDADE E
PERDA DE MASSA POR DESGASTE EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

**Alegrete
2017**

LUCAS DELLAGLIO LOPES

ANÁLISE DOS EFEITOS DE FIBRAS DE CAPIM ANNONI NA ADESIVIDADE E PERDA DE MASSA POR DESGASTE EM MISTURAS ASFÁLTICAS

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

Orientador: M.Sc. Diego Arthur Hartmann

**Alegrete
2017**

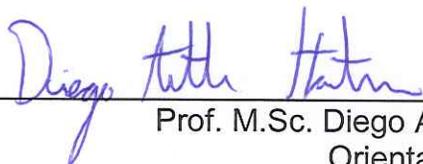
LUCAS DELLAGLIO LOPES

ANÁLISE DOS EFEITOS DE FIBRAS DE CAPIM ANNONI NA ADESIVIDADE E PERDA DE MASSA POR DESGASTE EM MISTURAS ASFÁLTICAS

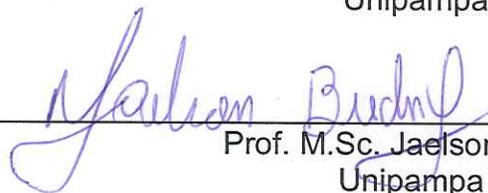
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 23 de junho de 2017.

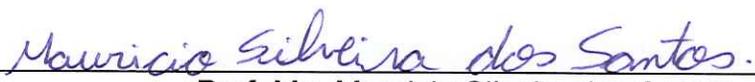
Banca examinadora:



Prof. M.Sc. Diego Arthur Hartmann
Orientador
Unipampa



Prof. M.Sc. Jaelson Budny
Unipampa



Prof. Me. Mauricio Silveira dos Santos
Unipampa

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal do Pampa – Unipampa, pela oportunidade de graduação. À todos os professores que tive ao longo do curso, em especial aos professores Diego, Jaelson e Mauricio, pela orientação, dedicação e ensinamentos prestados na realização deste trabalho.

À todos os funcionários da instituição, em especial aos técnicos dos laboratórios de Materiais de Construção Civil, de Solos e Pavimentação e de Química, Metalografia e Tratamentos Térmicos da Unipampa, pela colaboração na realização dos ensaios.

Aos meus pais, Carlos e Tania, minha irmã Carla e minha sobrinha Alice, pelo apoio, incentivo e confiança em todos os momentos.

Aos amigos e colegas que estiveram sempre ao meu lado nessa jornada.

RESUMO

Com a falta de manutenção, aumento da frota de veículos e pelos excessos de carga máxima permitida por eixos, muitas das rodovias brasileiras não estão mais possuindo as condições mínimas para trafegabilidade. Diante desta situação, é de grande importância os estudos na busca de novos métodos e materiais para melhorar a resistência dos pavimentos. Devido os bons resultados que as adições de diversos tipos de fibras à matriz de concreto convencional tem apresentado, o presente trabalho teve por finalidade adicionar fibras de capimannoni em misturas asfálticas a fim de analisar sua influência nos ensaios de adesividade e perda de massa por desgaste de misturas asfálticas. Para realização deste estudo, foram moldados corpos de prova com misturas convencionais e reforçadas pela adição de 0,5% e 1% de fibras de capimannoni (1 cm e 2 cm de comprimento), após isso, foram realizados dois ensaios para avaliação: Ensaio de Adesividade – Lottman Modificado e Ensaio de Perda de Massa por Desgaste - Cantabro. Após o ensaio, foi possível verificar que as misturas foram consideradas inadequadas para adesividade. Com os resultados do ensaio de resistência ao desgaste verificou-se para as misturas reforçadas uma situação aceitável pelo DNIT, porém, com valores inferiores em relação à mistura de referência. Assim, foi possível concluir que a adição de fibras em misturas asfálticas pode contribuir positivamente. Entretanto, para a situação da fibra de capimannoni, a mesma não mostrou-se viável em relação aos ensaios realizados, porém, é de extrema importância que outros ensaios sejam realizados para se obter uma conclusão definitiva para tal aplicação.

Palavras-Chave: misturas asfálticas, fibras de capimannoni, adesividade, perda de massa por desgaste.

ABSTRACT

With the lack of maintenance, increase of the vehicle fleet, and the excesses of the maximum load allowed per axle, many of the Brazilians highways do not have the minimum trafficability conditions. Under these conditions, it is of great importance to increase the studies searching for new methods and materials to improve the resistance of the pavements. Due to the good results that the additions of several types of fibers to the conventional concrete matrix have presented, the present work had the purpose of adding annoni grass fibers in asphalt mixtures in order to analyze its influence in the tests of adhesiveness and loss of mass by wear of asphalt mixtures. For the purpose of this study, specimens were molded with conventional mixtures and reinforced by the addition of 0.5% and 1% annoni grass fibers (1 cm and 2 cm length), after this, two tests were performed for evaluation: Adhesiveness Test - Modified Lottman and Mass Loss of Wear Test - Cantabro. After the test, it was possible to verify that the mixtures were considered inadequate for adhesiveness. With the results of the wear resistance test it was found for the reinforced mixtures a situation acceptable by the DNIT, but with lower values than the reference mixture. Thus, it was possible to conclude that the addition of fibers in asphalt mixtures can contribute positively. However, for the situation of annoni grass fiber, it was not feasible in relation to the tests performed, however, it is of extreme importance that other tests are carried out to obtain a definitive conclusion for such application.

Key words: asphalt mixtures, annoni grass fibers, adhesiveness, wear loss.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pavimento rígido	19
Figura 2 – Pavimento flexível	19
Figura 3 – Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas	20
Figura 4 – Classificação dos revestimentos flexíveis betuminosos.....	20
Figura 5 – Variação da serventia no tempo.....	22
Figura 6 – Classificação das fibras segundo BISFA	24
Figura 7 – Exemplo dos tipos de fibras.....	30
Figura 8 – Fluxograma dos procedimentos	35
Figura 9 – Agregados.....	36
Figura 10 – Peneiramento e separação granulométrica dos agregados	39
Figura 11 – Composição da mistura.....	41
Figura 12 – Ligante asfáltico	42
Figura 13 – Capim annoni.....	43
Figura 14 – Fibra de capim annoni	45
Figura 15 – Moldagem dos corpos de prova.....	47
Figura 16 – Etapas do condicionamento das amostras do segundo grupo	51
Figura 17 – Equipamento de abrasão Los Angeles.....	53
Figura 18 – Corpos de prova após a realização do ensaio.....	53
Figura 19 – Determinação da absorção de ligante pelas fibras	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaio granulométrico dos agregados, percentual passante	38
Tabela 2 – Percentual de finos em cada diâmetro de agregados	40
Tabela 3 – Composição da mistura	40
Tabela 4 – Ensaio de viscosidade CAP 50/70	43
Tabela 5 – Massa específica aparente e máxima da mistura convencional.....	54
Tabela 6 – Volume de vazios dos cps da mistura convencional.....	56
Tabela 7 – Absorção de ligante pelas fibras	57
Tabela 8 – Grupo 1: Rt das amostras sem condicionamento.....	58
Tabela 9 – Grupo 2: Rt das amostras com condicionamento	59
Tabela 10 – Valores finais de Rt1, Rt2 e RRT	60
Tabela 11 – Resultados de perda de massa.....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Faixas granulométricas.....	37
Quadro 2 – Características CAP 50/70	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica dos agregados	38
Gráfico 2 – Curva granulométrica de trabalho / Faixa “C” do DNIT.....	41
Gráfico 3 – Resistência à tração da fibra de capimannoni	44
Gráfico 4 – Módulo de elasticidade da fibra de capimannoni	44
Gráfico 5 – Massa específica aparente da mistura convencional.....	55
Gráfico 6 – Massa específica máxima da mistura convencional	55
Gráfico 7 – Teor ótimo de ligante da mistura convencional.....	56
Gráfico 8 – Rt média dos grupos de cada mistura asfáltica.....	59
Gráfico 9 – Resistência Retida à Tração – RRT	60
Gráfico 10 – Perda de massa.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

BISFA – *The International Bureau For The Standardisation of Man-Made Fibres*

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBR – *California Bearing Ratio*

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

SMA – *Stone Matrix Asphalt*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivo geral	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
1.2 Justificativa.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Estrutura dos pavimentos	18
2.1.1 Pavimento flexível	20
2.2 Mecanismos de degradação de pavimentos flexíveis.....	21
2.3 Utilização de fibras como material de reforço	23
2.3.1 Materiais compósitos cimentados reforçados com fibras	27
2.3.2 Tipos de fibras	30
2.3.2.1 Fibras metálicas	31
2.3.2.2 Fibras minerais	32
2.3.2.3 Fibras naturais.....	32
2.3.2.4 Fibras sintéticas	33
2.4 Adesividade	34
3 METODOLOGIA	35
3.1 Caracterização dos materiais.....	36
3.1.1 Agregados.....	36
3.1.1.1 Granulometria dos agregados	36
3.1.2 Ligante.....	42
3.1.2.1 Ensaio de viscosidade	42
3.1.3 Fibra de capim anonni	43
3.2 Dosagem Marshall.....	45
3.2.1 Massa específica aparente (Gmb).....	47
3.2.2 Massa específica máxima (Gmm)	48
3.2.3 Volume de vazios x teor ótimo de ligante	48
3.3 Ensaio de adesividade – Lottman Modificado	49
3.4 Perda de massa por desgaste – Ensaio Cantabro	52
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	54
4.1 Parâmetros de dosagem da mistura convencional	54

4.2 Adesividade – Metodologia Lottman Modificada.....	57
4.3 Perda de massa – Metodologia Cantabro	61
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
5.1 Conclusões	63
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	64
REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

Há anos o modal rodoviário tem sido a principal alternativa para a movimentação de pessoas e bens no Brasil. Na matriz de transporte de cargas, possui a maior participação (61,1%), seguido pelos modais ferroviário (20,7%), aquaviário (13,6%), dutoviário (4,2%) e aeroviário (0,4%). Na matriz de transporte de passageiros, o modal predomina com 95% de participação. Ademais, é o principal responsável pela integração de todo o sistema de transporte e contribui significativamente para o desenvolvimento socioeconômico do país (CNT, 2016).

A malha rodoviária pavimentada brasileira compreende 211.468 km de extensão, contrapondo-se aos 1.351.979 km de rodovias não pavimentadas. A expansão da malha rodoviária pavimentada brasileira não acompanha o ritmo de crescimento da frota de veículos que circulam pelo país. Nos últimos 10 anos, a frota de veículos no Brasil cresceu 110,4%, enquanto as rodovias federais cresceram somente 12,0% no acumulado dos últimos 10 anos (CNT, 2016).

O dimensionamento adequado de um pavimento asfáltico, visa assegurar que a repetição da passagem dos eixos dos veículos não irá causar o trincamento excessivo da camada de revestimento por fadiga dentro do período de vida do projeto e, também, garantir que as espessuras das camadas de sua estrutura, bem como suas características, sejam capazes de minimizar os efeitos do afundamento da trilha de roda (acúmulo excessivo de deformação permanente), considerando a compatibilidade entre as deformabilidades dos materiais (FRANCO, 2007).

Franco (2007) enfatiza ainda que, nos últimos anos o estudo da pavimentação vem experimentando um grande avanço tecnológico, tanto no Brasil quanto no exterior, devido em parte à pesquisa e ao desenvolvimento de diversos métodos de dimensionamento de pavimentos, com base em estudos acadêmicos e observações de dados de comportamento de pistas experimentais. O projeto de pavimentos asfálticos está em permanente evolução, seus conceitos em contínua discussão, com a disponibilização frequente de novos dados de pesquisas.

As camadas de revestimento incluem componentes de alto custo e merecem atenção especial. Dentre os fatores que influenciam o desempenho de uma camada asfáltica pode-se citar: características dos materiais, dosagem, condições de compactação, processo construtivo e plano de manutenção e restauração. Com o

aumento do custo dos materiais de construção, principalmente os derivados de petróleo, e redução da disponibilidade de materiais naturais, aliado às novas exigências/limitações impostas na construção e manutenção de pavimentos, é imperativo que os pesquisadores busquem materiais que possam apresentar bom desempenho com custo relativamente baixo (SPECTH, 2004)

Conforme o CNT (2016), os resultados pouco satisfatórios de avaliações das condições das rodovias são agravados pela sobrecarga de demanda nas estradas brasileiras, aliada à ausência de investimentos em manutenção e/ou conservação nos moldes necessários, o que, cada vez mais, tem contribuído para a depreciação da malha rodoviária brasileira. A necessidade de retomada econômica do Brasil nos próximos anos ampliará as demandas por uma maior eficiência na infraestrutura de transporte e, principalmente, reforçará a percepção da necessidade de o país dispor de rodovias com maior nível de qualidade.

Na atualidade, as fibras de modo geral têm sido utilizadas em grande escala como materiais de reforços e reparos na construção civil. A viabilidade da utilização de diversos tipos de fibras, sejam elas metálicas, minerais, naturais ou sintéticas, para reforço ou reparos na construção civil, tem apresentado bons resultados. Levando assim, todos os ramos da engenharia civil, estudar casos em que as fibras possam proporcionar ganhos, seja de resistência, controle de fissuração ou ductilidade, e buscar uma aplicação viável para as mesmas (CASAGRANDE, 2005).

Segundo Specht (2004), para que sejam desenvolvidos novos materiais, em qualquer área de conhecimento, é importante que se conheçam as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais de constituição, bem como suas possíveis combinações.

Neste contexto, o capim annoni, vegetal utilizado no estudo, apresenta uma elevada resistência à tração mecânica, podendo ser uma boa alternativa para reforço em misturas asfálticas. A adição de fibras vegetais pode melhorar a eficiência dos pavimentos, diminuindo assim, defeitos estruturais como deformações permanentes e o alto grau de trincamento, decorrente da fadiga dos revestimentos. Desta forma, o presente trabalho pretende avaliar o comportamento de misturas asfálticas reforçadas com fibras de capim annoni em relação à adesividade e à perda de massa por desgaste.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar os efeitos da adição de fibras vegetais de capimannoni na camada de revestimento de pavimentos flexíveis, observando se atende os requisitos predefinidos por norma relacionados à adesividade e verificar sua influência na resistência ao desgaste por abrasão do mesmo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência da adição de fibras vegetais em misturas asfálticas;
- Comparar o comportamento quanto à adesividade ligante-agregado das misturas asfálticas executadas com ligante asfáltico convencional e com adição de fibras;
- Verificar a influência das fibras quanto à resistência ao desgaste, comparando os resultados obtidos com misturas asfálticas convencionais.

1.2 Justificativa

Dentro desta busca por materiais novos e ambientalmente corretos para a construção civil, a utilização de fibras como material de reforço vem ganhando destaque, onde a incorporação destas em materiais cimentados, por exemplo, têm comprovado a eficiência na melhoria das propriedades mecânicas do material, principalmente no que se refere ao controle da fissuração, aumento da capacidade de carga pós-ruptura, aumento da durabilidade e resistência à tração (CORÓ, 2002).

Devido enorme importância, os pavimentos merecem uma atenção especial quanto aos estudos de desempenho, sempre analisando novas ideias a fim de prolongar sua vida útil. Uma das soluções que vem sendo aplicadas nas últimas décadas é a utilização de asfaltos modificados por polímero. A adição de materiais poliméricos traz vários benefícios aos ligantes asfálticos, como a redução da suscetibilidade térmica e o aumento da ductilidade, proporcionando estabilidade em altas temperaturas e reduzindo o risco de fratura em baixas temperaturas, além de

contribuir para uma melhor resistência ao intemperismo e uma melhor adesão ligante/agregado, mas em contrapartida, possuem custos muito elevados, dificuldades de transportes, armazenamento e incorporação na mistura (SPECHT, 2004).

Segundo Figueiredo (2000), as fibras de aço e de outros materiais estão sendo, usualmente, utilizadas em estruturas de concreto, com o objetivo de aumentar a ductilidade, auxiliar na resistência à tração e no controle de fissurações. A utilização de fibras vegetais também tem sido o foco de muitos estudos, além de apresentarem adequadas condições de uso, são de fácil obtenção e baixo custo. A incorporação de fibras de celulose e coco em misturas asfálticas tipo SMA, é um exemplo de experimento, no qual os resultados obtidos foram satisfatórios (VALE, 2007).

Conforme Alfaya *et al.* (2002), o capim *annoni* é considerado uma planta hostil e de difícil controle na agricultura, já passou por investigações a respeito da qualidade nutricional onde foram realizadas avaliações agronômicas e de seu uso como forrageira para animais de pastejo. Após a avaliação, essa espécie mostrou-se inapta para a utilização no pastejo em decorrência da sua baixa qualidade nutricional e elevada resistência à tração mecânica, resultando na baixa produtividade animal.

Heck (2015) analisou a utilização de fibras de polipropileno como material de reforço em pavimentos asfálticos, e a mesma apresentou-se viável, em que as amostras suportaram maiores deformações num período de tempo com tensões mais baixas que às de pico, além de manter a mistura asfáltica dentro dos padrões relacionados ao módulo de resiliência. Contudo, Aduati (2016), diante da necessidade de avaliar outras propriedades do pavimento, complementou a pesquisa analisando os efeitos da fibra de polipropileno em relação à vida de fadiga e adesividade de misturas asfálticas, onde as quais também mostraram um desempenho satisfatório.

Portanto, é válido dizer que o uso de fibras pode sim trazer benefícios para misturas asfálticas. Sendo assim, com o intuito de avaliar a possibilidade de utilização de fibras vegetais em misturas asfálticas reforçadas com fibras, a pesquisa justificase na necessidade de analisar os efeitos da fibra de capim *annoni* em relação à adesividade e perda de massa por desgaste de misturas asfálticas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão bibliográfica, abordando tópicos relacionados ao tema do trabalho e que possam complementar o mesmo com algumas informações necessárias.

2.1 Estrutura dos pavimentos

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, dispostas sobre a superfície final de terraplenagem, com propósito técnico e econômico de resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, conforto, economia e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT (2006a) define o pavimento de uma rodovia como sendo uma estrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas que são assentes sobre uma fundação, o subleito, com a função de resistir aos esforços oriundos do tráfego. Assim, este subleito, deve ser estudado e considerado até a profundidade onde as cargas de tráfego atuam de forma significativa.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), os pavimentos rodoviários são tradicionalmente classificados em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. Outra denominação utilizada mais recentemente é pavimentos de concreto de cimento Portland e pavimentos asfálticos, indicando assim o tipo de revestimento do pavimento.

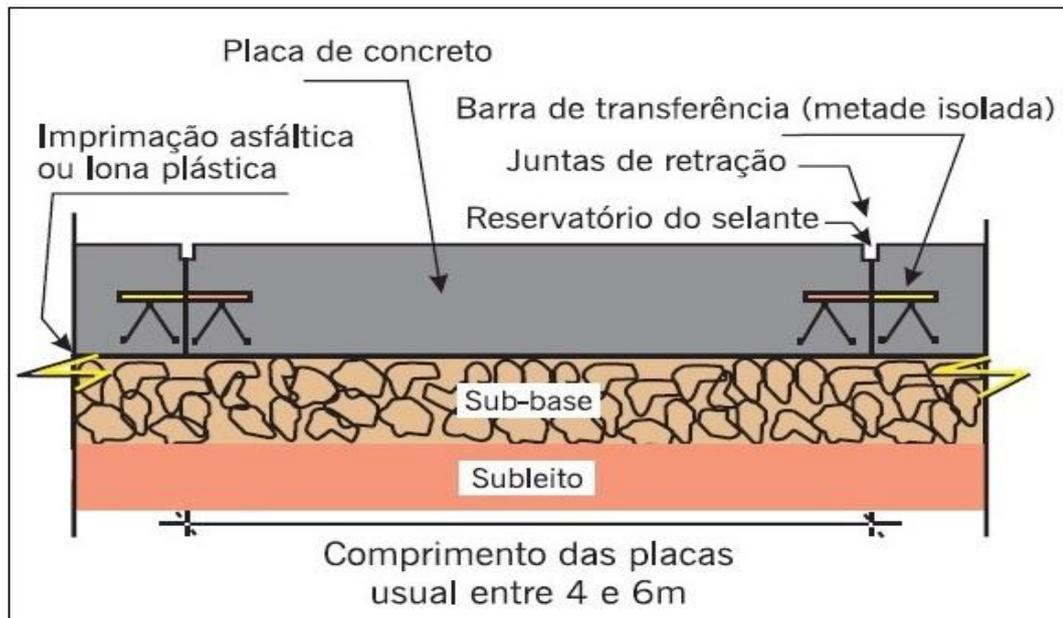
Os pavimentos rígidos tem como revestimento uma placa de concreto de cimento Portland, a qual a espessura é determinada em função da sua resistência à flexão e das resistências das camadas subjacentes. Podendo as placas de concreto ser armadas com barras de aço ou não. Usualmente define-se a subcamada desse pavimento como sub-base, uma vez que qualidade do material é equivalente à sub-base de pavimentos asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os pavimentos flexíveis são formados por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço de subleito. Tendo como revestimento uma mistura asfáltica, composta basicamente de agregados e ligante

asfáltico, destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmitir os esforços de forma amenizada às camadas inferiores (BERNUCCI *et al.*, 2008).

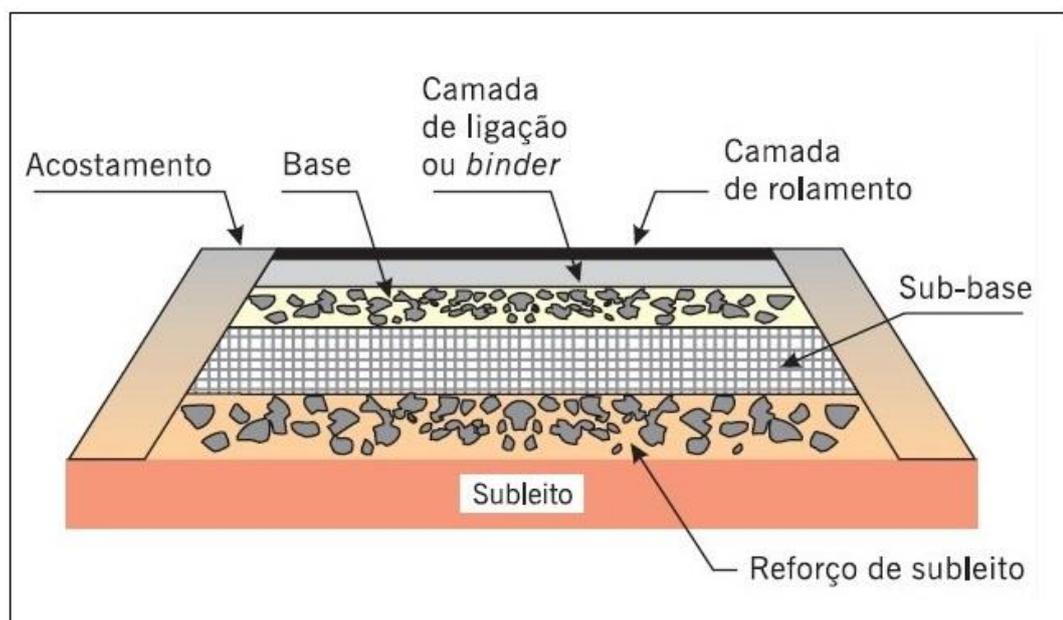
As Figuras 1 e 2 apresentam de forma ilustrativa a composição dos dois tipos de pavimentos considerados, rígidos e flexíveis.

Figura 1 – Pavimento rígido



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

Figura 2 – Pavimento flexível



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

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

Tendo por função estrutural resistir às diversas 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 componentes fundamentais, sendo eles: o tráfego; e a capacidade de suporte do solo. Deste modo, os materiais utilizados para compor cada camada devem garantir o comportamento estrutural adequado, principalmente no que se refere ao módulo de rigidez e à ruptura por fadiga, além das condições superficiais do pavimento quanto à segurança e ao conforto (MOMM *et al.*, 2011).

Conforme Balbo (2007), o terreno que serve de fundação para pavimentos asfálticos é denominado subleito. Este é constituído normalmente pela compactação do material natural já disposto no local, ou então por material transportado e compactado, nos casos de aterros. Os esforços transmitidos ao subleito são suavizados em profundidade pelas camadas que estão sobrepostas ao mesmo.

Quando necessário, usualmente acima do subleito, é colocada uma camada de espessura constante com características geotécnicas inferiores ao material usado na camada que lhe for superior, porém melhores que o material do subleito, esta camada é denominada reforço do subleito e é utilizada tanto por questões técnicas quanto econômicas (DNIT, 2006a).

2.2 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

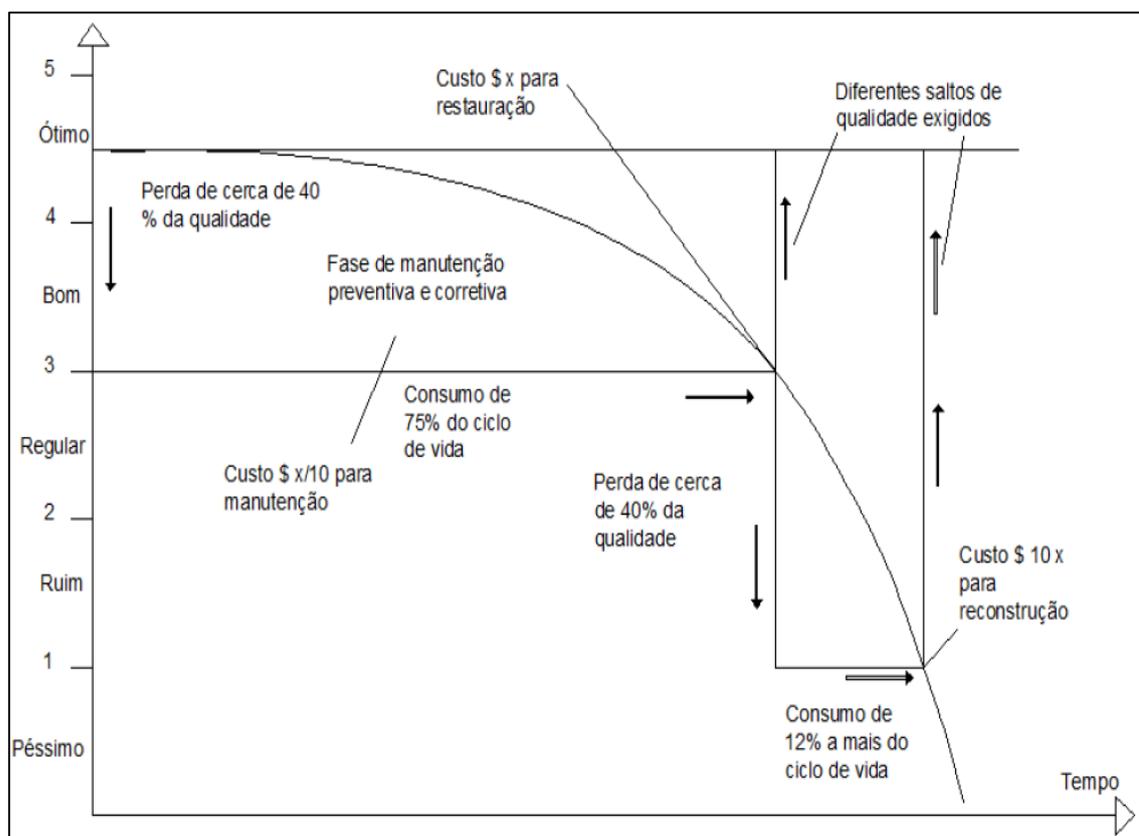
de perda de eficiência do pavimento ao longo do tempo é conhecido como deterioração do pavimento (DNIT, 2006b).

Segundo Specht (2004), a degradação de pavimentos flexíveis 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).

Balbo (2007) apresenta uma relação de forma sucinta para exemplificar a variação da serventia ao longo do tempo, como apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Variação da serventia no tempo



Fonte: Balbo (2007, p.259)

A AASHTO adotou o critério de ruptura por serventia para definir equações de desempenho, onde a qualidade de rolamento é avaliada em uma escala de zero a cinco (ordenadas) e as abscissas representam o tempo decorrido ou o tráfego acumulado (BALBO, 2007).

A norma DNER-PRO 010/79, 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 refere-se a fase de consolidação, ou seja, logo após a construção, é ao final desta fase que a deflexão tende a estabilizar. A segunda fase é a 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 está 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).

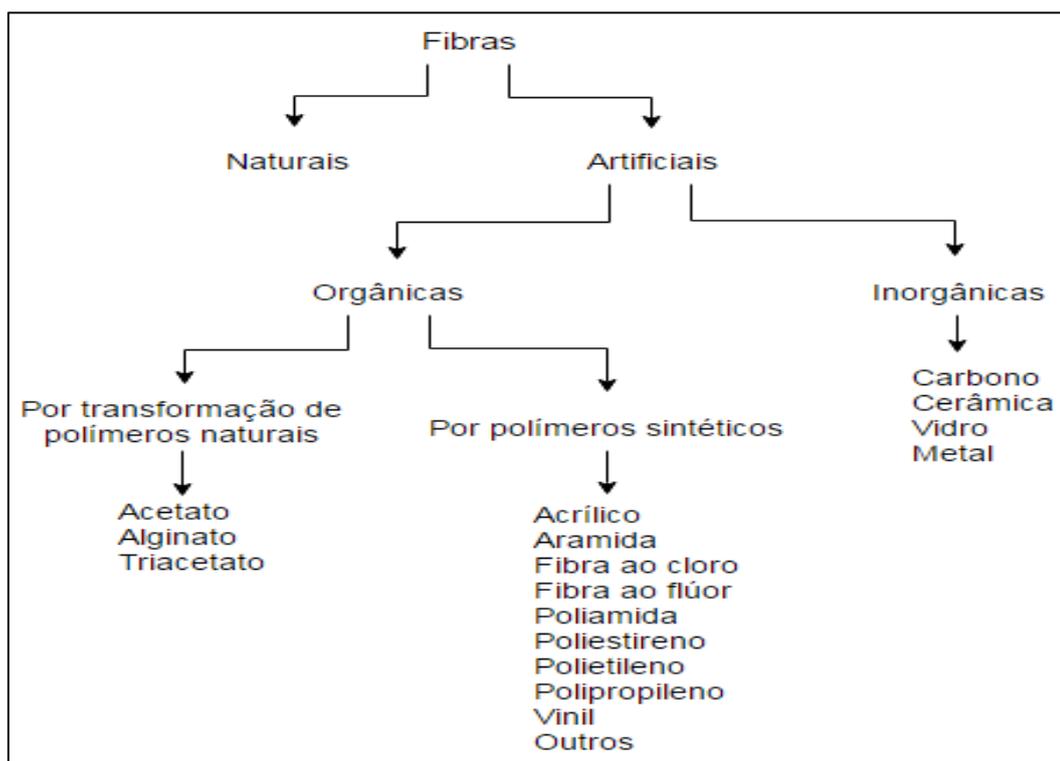
2.3 Utilização de fibras como material de reforço

As fibras são materiais finos, fibrilados e alongados. Existem basicamente duas grandes classes de fibras: as naturais, que são encontradas prontas na natureza; e as artificiais, as quais são divididas em duas classes: as orgânicas, que são produzidas pelo homem através de materiais encontrados na natureza; e as inorgânicas, que também são produzidas pelo homem, porém, oriundas de produtos químicos (DOBBIN; ROCHA, 2011).

Pesquisas envolvendo a utilização de fibras como material de reforço para materiais de construção civil, entre os quais destacam-se o gesso, concretos, argamassas e solos coesivos e granulares, têm sido cada vez mais constantes e envolvido diversos tipos de fibras, as quais diferem uma das outras desde seu processo de fabricação, composição química e física, características mecânicas e de resistência a meios agressivos (SPECHT, 2010).

A Figura 6 apresenta uma classificação geral das fibras conforme o BISFA.

Figura 6 – Classificação das fibras segundo BISFA



Fonte: Adaptado de Maccaferri (2009, p14)

As primeiras fibras utilizadas na construção civil, com caráter de reforço, foram as de amianto, para a produção de componentes de pequena espessura, como painéis, telhas e placas, no início do século XX. Porém, há relatos da utilização de palhas na fabricação de tijolos no antigo Egito (TANESI; FIGUEIREDO, 1999). Entretanto, o início do estudo científico sobre o comportamento destes compósitos deu-se apenas na metade do século com a entrada das fibras de aço e de vidro no mercado (BENTUR; MINDESS, 1990).

Um exemplo de compósito produzido com o objetivo de melhorar o desempenho mecânico da matriz são os plásticos reforçados com fibras de vidro. Estes plásticos utilizam polímeros termofixos como o poliéster, cujo comportamento mecânico característico é frágil. A resistência mecânica do conjunto plástico com fibras de vidro é maior que a do plástico não reforçado, aumentando as possibilidades de uso do material, como acontece com as telhas produzidas a partir dele, que conseguem vencer vãos bem maiores do que aquelas de plástico não reforçado (FIGUEIREDO, 2000).

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

Figueiredo (2000) menciona que, um compósito que tem tido um aumento no volume de aplicação são as argamassas e concretos reforçado com fibras. Um ganho apreciável de desempenho quanto ao controle de fissuração por retração plástica foi observado para argamassas de reparo, onde o baixo módulo de elasticidade das fibras é suficiente para inibir a propagação das fissuras. Quando se adicionam fibras ao concreto, por exemplo, o mesmo deixa de ter o caráter conhecidamente frágil. Isto ocorre devido a fibra servir como vínculo de transferência de tensões pelas fissuras, minimizando a concentração de tensões nas extremidades. Assim, tem-se uma grande diminuição da velocidade de propagação das fissuras no concreto, que apresenta uma certa capacidade portante pós-fissuração.

Para Feuerharmel (2000), a utilização de fibras como material de reforço em solos é uma prática nova e promissora, 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. O primeiro efeito provocado pela inclusão de fibras ao solo pode ser detectado já na compactação, formando uma estrutura distinta de um solo sem fibras. Mantendo-se constante a energia de compactação, a inclusão de fibras provoca um aumento do índice de vazios do solo.

Diversos estudos têm sido elaborados sobre a utilização de fibras ao solo como alternativa para material de reforço. Quando incorporadas ao solo, ocorre um aumento na capacidade de suporte a esforços de tração, fazendo com que a mudança destes parâmetros torne o método satisfatório, evidenciando assim o estudo do uso de fibras nas mais diversas obras de engenharia que necessitam ganho de resistência (TRINDADE *et al.*, 2005).

O melhoramento das propriedades dos solos reforçados com fibras depende exclusivamente dos parâmetros das fibras, como: comprimento, teor, resistência à tração, módulo de elasticidade, rugosidade e orientação. Dos parâmetros do solo, como: grau de compactação, forma e distribuição granulométrica das partículas. Assim como da tensão de confinamento e do modo de carregamento aplicado à

estrutura. Contudo, algumas mudanças ocorrem no comportamento mecânico dos solos reforçados com fibras, as quais estão relacionadas com: resistência, rigidez inicial, modo de ruptura e variação volumétrica (VENDRUSCOLO, 2003).

No que se refere o uso de fibras como material de reforço em pavimentos flexíveis, pode-se dizer que não há muitos estudos explorados. Uma vez que, os estudos que existem nessa área é com relação à misturas asfálticas do tipo SMA (Stone Matrix Asphalt), essa mistura se caracteriza pela graduação descontínua com cerca de 70-80% de agregados na sua constituição, de 6-7% de ligante e aproximadamente 4% de índices de vazios. (BABADOPULOS *et al.*, 2008).

Segundo Silva (2012), por apresentar granulometria descontínua e alto teor de ligante, em relação às misturas densas contínuas tradicionais, o SMA necessita do uso de fibras, estas inibem o escorrimento do material asfáltico. Sua adição não modifica quimicamente o ligante, mas aumenta as propriedades físicas do produto final, pois possibilita o uso de teores elevados do mesmo.

Conforme Souza (2010), as fibras na sua concepção, quando adicionadas ao ligante asfáltico, funcionam como agentes de reforço, portanto não podem ser consideradas como modificadores destes. No entanto, existem fibras que reagem quimicamente com o ligante asfáltico e nesses casos pode-se considerar estas fibras como sendo um modificante. Quando age como agente de reforço e modificante influencia diretamente nas propriedades mecânicas e na durabilidade da mistura asfáltica. O efeito depende do tipo (forma, tamanho, superfície de contato, ramificações) e teor de fibra adicionado. A temperatura de adição é específica para cada tipo de fibra.

As fibras atuam de duas formas distintas quando adicionadas em misturas asfálticas. Elas possuem uma ação a curto prazo, que atua durante a produção, transporte e espalhamento na pista, de forma a possibilitar o aumento do percentual de ligante sem que ocorra o escorrimento do mesmo. E também, atuam a longo prazo, influenciando as propriedades mecânicas e a durabilidade da mistura asfáltica durante sua vida de serviço (HOMEM, 2002).

2.3.1 Materiais compósitos cimentados reforçados com fibras

Compósitos são materiais constituídos por duas fases: a matriz; e o reforço. Geralmente, o papel do reforço é exercido pelas fibras, cujo suas características associadas às propriedades da matriz governam o comportamento mecânico do compósito. Para um estudo de uma metodologia racional de dosagem e escolha de fibras, é necessário que se compreenda o mecanismo do reforço das fibras na fase pós-fissuração, bem como a iteração fibra-matriz (NUNES, 2006).

Em resumo as fibras em uma matriz cimentada podem em geral ter dois efeitos importantes. Primeiro, elas tendem a reforçar o compósito sobre todos os modos de carregamento que induzem tensões de tração, isto é, tração indireta, flexão, e cisalhamento, e, secundariamente, melhoram a ductilidade e a tenacidade de uma matriz com características frágeis (CASAGRANDE, 2001).

De modo geral, a caracterização das propriedades dos compósitos é crucial no seu processo de produção e em sua aplicação, o que torna notável o interesse no desenvolvimento de pesquisas que subsidiem a prática do emprego dos compósitos reforçados com fibras, através da identificação do conjunto de fatores que atuam diretamente na eficácia do reforço fibroso, principalmente, no que tange à sua utilização na matriz cimentícia. Quanto a isso, é possível perceber as diferentes ênfases atribuídas aos fatores no processo de produção do compósito que influenciam no desempenho do reforço com fibras (QUININO, 2015).

Conforme Casagrande (2001), os principais parâmetros relacionados ao desempenho dos materiais compósitos cimentados reforçados com fibras, listados por Taylor (1994), são: teor de fibra, módulo de elasticidade da fibra, aderência entre a fibra e a matriz, resistência da fibra e o comprimento da fibra. Os quais são descritos a seguir.

- Teor de fibra: um alto teor de fibras confere maior resistência pós-fissuração e menor dimensão das fissuras, desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pela fissura;
- Módulo de elasticidade da fibra: um alto valor do módulo de elasticidade causaria um efeito similar ao teor de fibra, mas na prática, quanto maior o módulo maior a probabilidade de haver o arrancamento das fibras;

- Aderência entre a fibra e a matriz: as características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos cimentados reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz. Uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito;
- Resistência da fibra: aumentando a resistência das fibras, aumenta, também, a ductilidade do compósito, assumindo que não ocorra o rompimento das ligações de aderência. A resistência necessária dependerá, na prática, das características pós-fissuração necessárias, bem como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz;
- Comprimento da fibra: quanto maior for o comprimento das fibras, menor será a possibilidade delas serem arrancadas. Para uma dada tensão de cisalhamento superficial aplicada à fibra, esta será melhor utilizada se o seu comprimento for suficientemente capaz de permitir que a tensão cisalhante desenvolva uma tensão trativa igual à sua resistência à tração.

Para Casagrande (2005), é evidente a importância não apenas do comprimento da fibra, mas também, do diâmetro desta. A relação l/d (comprimento/diâmetro) ou fator de forma, como é denominado, é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra e a resistência de aderência fibra/matriz. Se a fibra tem uma alta resistência à tração, como as fibras de aço, por exemplo, a resistência de aderência necessária deverá ser alta para impedir o arrancamento da mesma antes que a resistência à tração seja totalmente mobilizada, ou ainda fibras de alto fator de forma deverão ser utilizadas.

Segundo Quinino (2015), um incremento mais acelerado do índice de aplicação de compósitos na construção civil depende, todavia, da superação de alguns obstáculos. A literatura tem apontado alguns inconvenientes no que diz respeito ao uso dos materiais compósitos, tais como, seu comportamento mecânico complexo, resultado da sua heterogeneidade e anisotropia, decorrentes das diferenças entre a matriz e os elementos de reforço, e algumas questões referentes ao custo. Entretanto, é necessário considerar aspectos importantes como a economia no transporte e manipulação de materiais compósitos, devido ao seu baixo peso, a possibilidade de pré-fabricação desses materiais, o que diminui o trabalho na obra, as características

positivas em termos de durabilidade e trabalhabilidade, entre outros, que podem reduzir custos de produção ao longo do tempo.

As pequenas fissuras fazem com que os concretos reforçados com fibras sejam mais resistentes a agentes agressivos. As fissuras, porta de entrada de agentes agressivos, são bem menores e, além disso, deve ser considerado que o concreto não possui armadura ou a reduz consideravelmente, o que pode eliminar o processo de corrosão em função da penetração de água e outros agentes agressivos. Mesmo que não atinjam resistências tão elevadas, os compósitos com alto teores de fibras possuem uma melhoria de ductilidade. Logo, adquirem capacidade de deformação elevada, o que os favorecem quando submetidos à ação de esforços de tração (CASAGRANDE, 2005).

As fibras de aço, quando adicionadas ao concreto, dificultam a propagação das fissuras devido ao seu elevado módulo de elasticidade. Pela capacidade portante pós-fissuração que o compósito apresenta, as fibras permitem uma redistribuição de esforços no material mesmo quando utilizada em baixos teores. Isto é particularmente interessante em estruturas contínuas como os pavimentos de concreto. Para melhor entender este comportamento deve-se lembrar que o concreto, como um material frágil, apresenta-se sempre susceptível à concentração de tensões quando do surgimento e propagação de uma fissura a partir do aumento da tensão a ele imposta (FIGUEIREDO, 2000).

As fibras sintéticas ou poliméricas se tornaram muito atrativas recentemente. De um modo geral, as propriedades das fibras sintéticas variam muito, em particular com respeito ao módulo de elasticidade e para aumentar a resistência dos compósitos, as fibras precisam apresentar módulo de elasticidade maior que o módulo da matriz. Por esse motivo as fibras sintéticas são denominadas de baixo módulo, o que dificulta o seu emprego como reforço de compósitos. Entretanto, o baixo módulo das fibras de polipropileno é suficiente para inibir a propagação das fissuras (QUININO, 2015).

O emprego de fibras sintéticas pode vir a ser interessante em aplicações onde o reforço da matriz não é o objetivo principal, sendo melhor destinadas ao controle de micro fissuração por retração, que comumente surge durante a hidratação inicial do concreto. Uma das vantagens do uso de fibras de polipropileno no concreto pode estar ligada à sua trabalhabilidade no estado fresco, pois essas colaboram para sensível redução na exsudação do concreto (TANESI; FIGUEIREDO, 1999).

A avaliação da durabilidade dos compostos formados com fibras vegetais é o principal problema a ser investigado, pois podem se degradadas pela adição de fungos e microrganismos. A exposição de fibras vegetais a ambientes alcalinos causa uma rápida degradação das fibras, um exemplo que pode ser citado é o emprego das fibras vegetais como reforço de materiais cimentados (SPECHT, 2004).

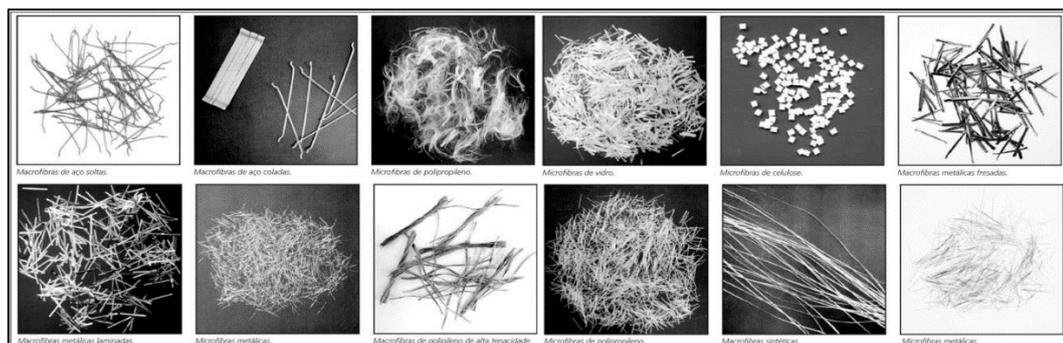
2.3.2 Tipos de fibras

Existe uma ampla variedade de fibras utilizadas em compósitos fibrosos. As características de comportamento de cada uma delas, assim como as propriedades físicas, químicas e mecânicas, que por sua vez irão afetar a atuação do material compósito, estão profundamente relacionadas ao material do qual são compostas e ao seu processo de fabricação (CASAGRANDE, 2005).

Casagrande (2005) complementa ainda que, a compreensão do mecanismo de interação matriz-reforço e da parcela de contribuição de cada uma das fases no comportamento do material compósito como um todo é fundamental para a definição do tipo de fibra a ser empregado. Esta definição dependerá fundamentalmente das características da matriz a ser reforçada e das características desejadas do material compósito resultante. É válido ressaltar que algumas características são fundamentais na escolha do tipo de fibra que será empregado para reforço do material, como: ser quimicamente neutra e não deteriorável, estar livre de sofrer ataques de fungos, bactérias ou álcalis, não ser prejudicial à saúde humana e apresentar características apropriadas para utilização.

A Figura 7 apresenta alguns exemplos dos variados tipos de fibras.

Figura 7 – Exemplo dos tipos de fibras



Fonte: Adaptado de Maccaferri (2009, p14)

Segundo Casagrande (2005), as fibras podem ser classificadas em quatro grandes classes: metálicas, minerais, naturais e sintéticas. Conforme apresentadas a seguir:

2.3.2.1 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. A ruptura do compósito é normalmente associada ao arranchamento da fibra e não à sua ruptura (CASAGRANDE, 2005).

Para Figueiredo (2000), as fibras de aço são elementos descontínuos produzidos com uma variada gama de formatos, dimensões e mesmo de tipos de aço. Há três tipos mais comuns de fibras de aço disponíveis no mercado: a corrugada e as com ancoragem em gancho de seção retangular ou circular. As mesmas tem como vantagens o baixo custo e a pouca ou nenhuma interferência na consistência do concreto. 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.

O uso das fibras de aço no concreto proporciona um melhor comportamento dos elementos estruturais, devido à redução da formação de fissuras, resultando em melhor qualidade e maior durabilidade da obra. Outras vantagens em relação ao seu uso é que substitui, em algumas situações, a armadura convencional, e elimina ou diminui custos com mão-de-obra para armação e, praticamente, não gera desperdício de material. Além disso, não exige grandes investimentos para transporte e estocagem, e seu manuseio e aplicação são simples (QUININO, 2015).

2.3.2.2 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). Conforme Carneiro (2004), as fibras de carbono têm elevadas rigidez e resistência a todos os tipos de ataque químico (por ser o carbono um material inerte), bom comportamento à fadiga, a cargas cíclicas, à variação térmica e reológico, e pequeno peso, o que as tornam ideais para uso na indústria aérea.

As fibras de vidro na atualidade vêm sendo empregadas desde a indústria automobilística, aeronáutica, naval e na construção 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 capacidade de deformação e boa resistência mecânica. Sendo que a eficiência de reforço das fibras descontínuas é menor do que as fibras contínuas (SANTOS, 2006). Entretanto, Carneiro (2004) ressalta que as mesmas possuem baixa resistências à fadiga, à abrasão e à fluência, menor rigidez e fraca capacidade de aderência a polímeros, e se degradam na presença de água, ácidos e solução alcalina, fato que pode ser contornado com o uso de uma adequada matriz.

2.3.2.3 Fibras naturais

Houve um grande avanço tecnológico no desenvolvimento de novos materiais e as fibras naturais passaram a ter menor uso. Entretanto, vários estudos têm sido realizados sobre as aplicações das fibras de sisal, juta e coco em compósitos reforçados, voltados para analisar em especial a melhoria das propriedades físicas e mecânica dos mesmos, quando reforçados com fibras vegetais. Em resumo, eles mostram a potencialidade da aplicação industrial das fibras vegetais na utilização de novos materiais compósitos (SANTOS, 2006).

Para Casagrande (2001), 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 100 MPa e módulo de elasticidade entre 10 e 25 GPa.

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).

2.3.2.4 Fibras sintéticas

As fibras sintéticas representam uma alternativa criada pelo homem para atender às necessidades de diversas indústrias, antes dependentes das fibras encontradas na natureza, principalmente o amianto. As fibras artificiais foram desenvolvidas, com o objetivo de copiar e melhorar as características e propriedades das fibras naturais. E, na medida em que suas aplicações foram crescendo, sua importância começou a se incrementar, juntamente com as tecnologias empregadas em sua produção (QUININO, 2015).

Conforme Casagrande (2001), as fibras sintéticas ou poliméricas 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.

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. Vários formatos de fibras poliméricas têm sido empregadas como reforço de solos, com destaque para as chamadas fibriladas, as quais apresentam um formato trançado quando esticadas transversalmente, projetadas para que se “abram” durante o processo de mistura do solo.

2.4 Adesividade

Em misturas asfálticas, a perda de adesão entre agregado e ligante geralmente está relacionada a três fatores: a incompatibilidade entre a constituição mineralógica do agregado e a constituição física e química do material betuminoso, a ocorrência de umidade e a presença de sujeira e finos na superfície do agregado. Muitos tipos de defeitos em pavimentos, como o caso de trincamento por fadiga, deformação permanente e danos por umidade são originados da perda de adesão do ligante asfáltico com a superfície do agregado (LYTTON, 2004 *apud* OLIVEIRA FILHO; SOARES).

De acordo com Furlan (2006), a ruptura das misturas asfálticas está ligada a ruptura da película adesiva, que se caracteriza pela formação de um plano de ruptura interfacial, completo ou parcial, na ligação entre asfalto e agregado. Basicamente são cinco os modos de ruptura da ligação adesiva entre ligante e agregado:

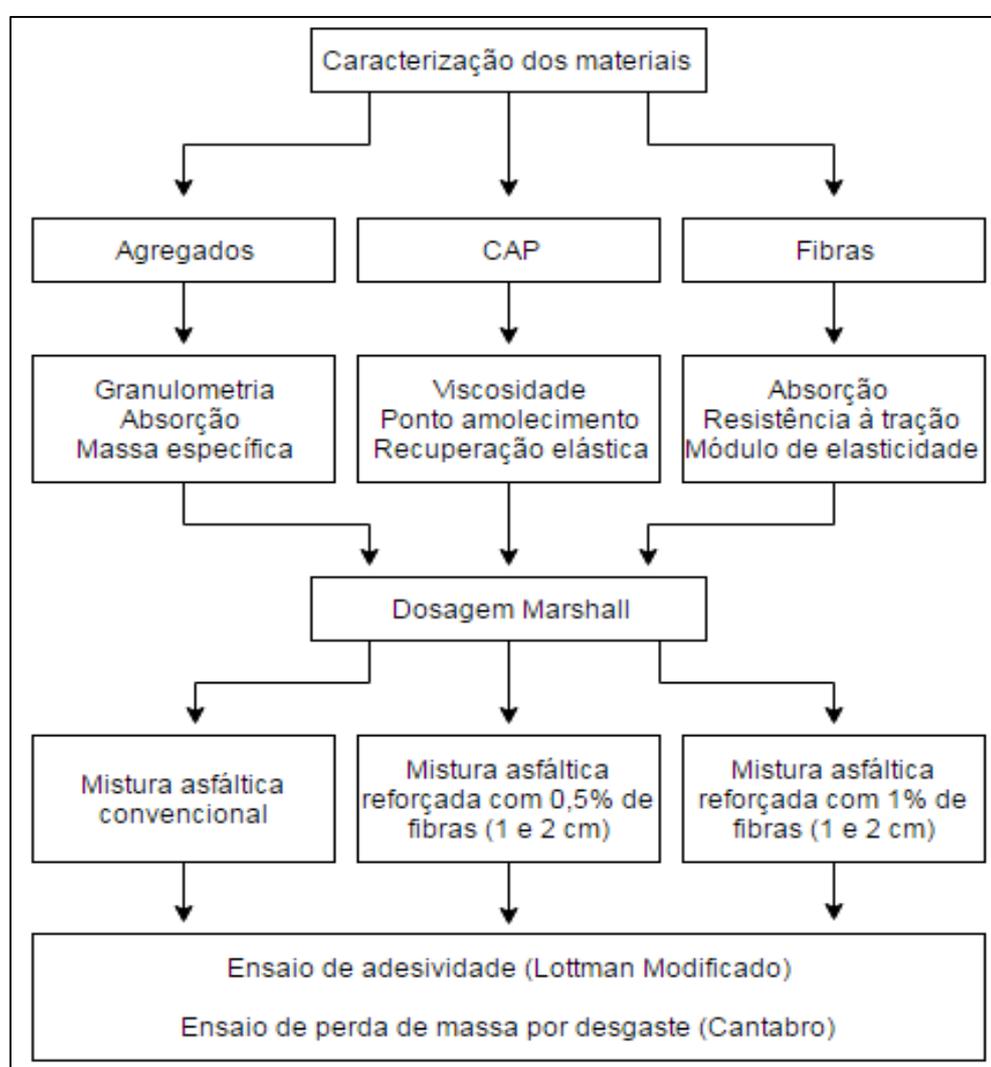
- Deslocamento: a água desloca a película do asfalto da superfície do agregado;
- Desprendimento: a umidade do agregado antes da mistura separa-o do asfalto;
- Emulsificação espontânea: a água é incorporada pelo asfalto e emulsifica-o;
- Pressão nos poros: a água aprisionada nos vazios da mistura saturada, aliada as cargas do tráfego percola sob pressão, descolando a película do asfalto;
- Lavagem hidráulica: em condições úmidas as repetições do tráfego pesado proporcionam ciclos de compressão, que expõem o ar dos vazios da mistura, e relaxação, que absorve água pela criação de vácuo parcial.

Existem vários tipos de métodos aplicáveis para verificação das características de adesividade de misturas asfálticas, dentre estes, estão os métodos empíricos onde o contato entre ligante asfáltico e agregado é avaliado visualmente e procura-se correlacionar os resultados com o possível desempenho em campo. O outro grupo de ensaios é baseado no comportamento mecânico das misturas onde as amostras são submetidas a um condicionamento e/ou esforço mecânico para provocar de forma acelerada ou similar ao que ocorre no campo, neste grupo estão, dentre outras, a Metodologia Lottman Modificada (AASHTO T 283-89) e o método Cantabro (DNER – ES 383/99) (BUDNY, 2009).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados a pesquisa, os métodos e os procedimentos adotados para o desenvolvimento do trabalho. Serão utilizados ensaios laboratoriais para as análises e avaliações das características das misturas asfálticas convencionais e das misturas asfálticas com adição de fibras de capimannoni. A figura 8 apresenta um fluxograma com os procedimentos e ensaios a serem realizados.

Figura 8 – Fluxograma dos procedimentos



Fonte: Elaboração própria

3.1 Caracterização dos materiais

3.1.1 Agregados

Os agregados que foram utilizados para realização deste trabalho são provenientes de agregados basálticos, encontrados no município de Alegrete-RS. Estes foram submetidos aos ensaios de massa específica e absorção conforme regulamentam as normas DNER-ME 081/98 e DNER-ME 194/98 e obtiveram como resultado uma massa específica média de $2,772 \text{ g/cm}^3$ e uma absorção de 2,01%. A Figura 9 apresenta o material depositado atrás do Laboratório de Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Pampa – Unipampa, campus Alegrete.

Figura 9 – Agregados



Fonte: Elaboração própria

3.1.1.1 Granulometria dos agregados

O ensaio de granulometria dos agregados propõe identificar a faixa de enquadramento da amostras ensaiadas, de acordo com as especificações normatizadas pelo DNIT. O Quadro 1 apresenta as faixas granulométricas aceitáveis pelo DNIT para projetos.

Quadro 1 – Faixas granulométricas

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
¾"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
½"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2,0	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 - ES (DNIT, 2006, p.5)

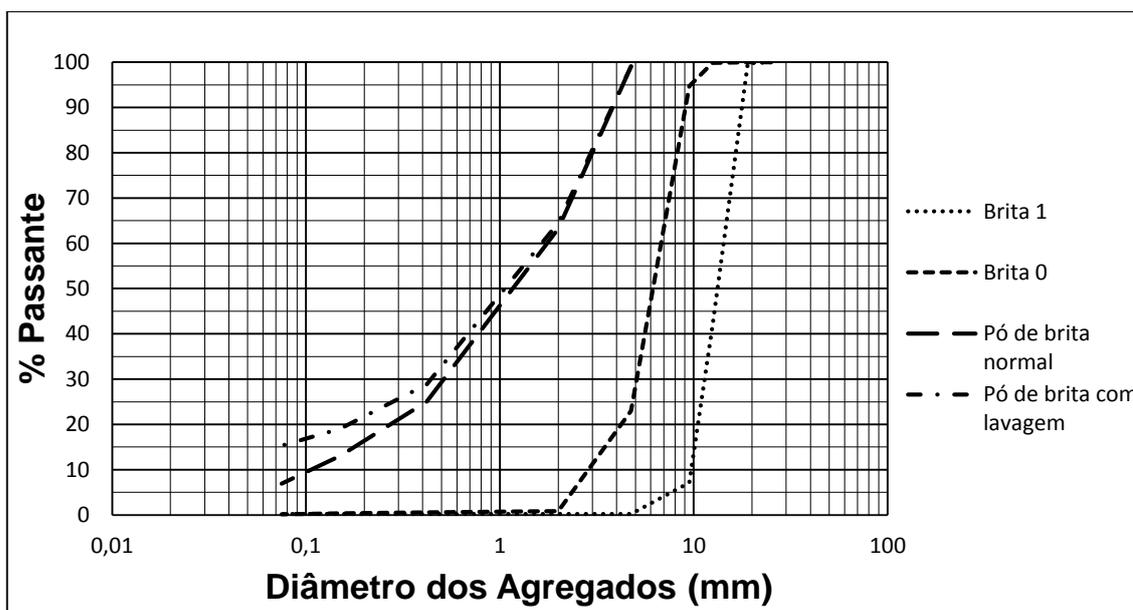
O ensaio de granulometria foi executado conforme a norma DNER-ME 083/98, em que se utilizam peneiras de malha quadrada e de aberturas regulamentadas. A Tabela 1 apresenta os valores das porcentagens passantes dos agregados ensaiados (pó de brita, brita 0 e brita 1) e para uma melhor análise das amostras ensaiadas, as mesmas estão apresentadas também no Gráfico 1.

Tabela 1 – Ensaio granulométrico dos agregados, percentual passante

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

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 1 – Curva granulométrica dos agregados



Fonte: Elaboração própria

Observa-se que existe uma deficiência de finos nos agregados ensaiados, o que não permite compor uma curva granulométrica dentro dos limites estipulados pela norma. Portanto, para a realização dos ensaios, foi necessário separar os agregados em peneiras, para que o excesso de algumas frações fosse desprezado.

Então, após a coleta dos agregados, os mesmos foram colocados em uma estufa com temperatura de 105 °C durante 24 horas para secagem. Posteriormente à

secagem, foi realizado o peneiramento do material e sua separação granulométrica em sacos plásticos. A figura 10 apresenta o processo de separação granulométrica do material.

Figura 10 – Peneiramento e separação granulométrica dos agregados



Fonte: Elaboração própria

No ensaio de granulometria com lavagem, foi possível determinar a porcentagem de material pulverulento (passante na peneira #200), a qual ficou determinada em 15%. Entretanto, não ficou estabelecida em qual faixa granulométrica esse material pulverulento estaria ficando depositado entre as partículas. Fazendo-se necessário determinar a porcentagem de material fino para cada diâmetro de agregado separadamente, realizando o mesmo procedimento de lavagem. Então, com o material já separado em seus respectivos diâmetros, foi realizada a pesagem e lavagem do mesmo na peneira #200, e posteriormente à secagem, foi determinado o peso final das amostras e a porcentagem de finos existente em cada diâmetro de agregados. Possibilitando assim, a correção da composição dos materiais que foram utilizados para dosagem. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Percentual de finos em cada diâmetro de agregados

Peneiras		Peso Inicial Amostra (g)	Peso Final Amostra (g)	Porcentagem de Finos (%)
Malha (mm)	Nº			
2	10	700	693,19	0,97
0,42	40	700	679,15	2,98
0,15	100	400	370,34	7,42
0,075	200	400	323,22	19,20

Fonte: Elaboração própria

Portanto, a composição da mistura pode ser analisada na Tabela 3 (e Figura 11), onde é apresentada a quantidade real de material existente na mistura, assim como a quantidade utilizada para pesagem do mesmo, feita as devidas correções. 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, foi utilizado 1% de cal hidratada.

Tabela 3 – Composição da mistura

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

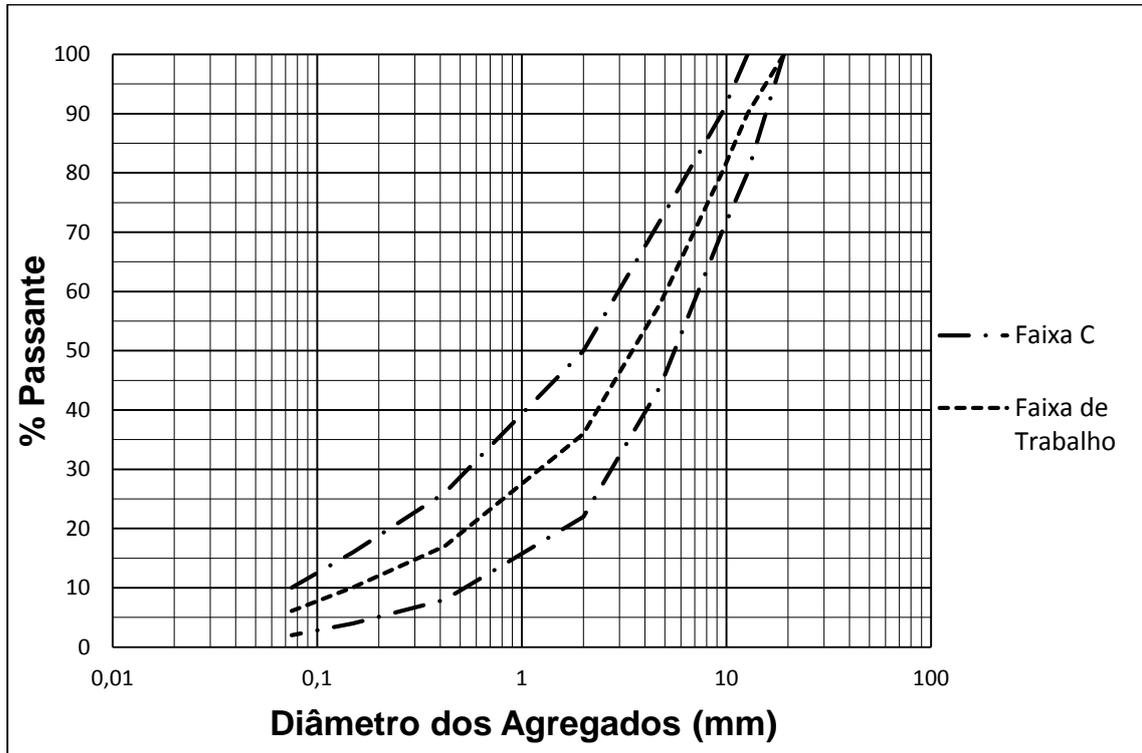
Fonte: Elaboração própria

Figura 11 – 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. Para fins de estudo, algumas características do CAP são apresentadas no Quadro 2 e a Figura 12 apresenta uma amostra do ligante asfáltico que foi utilizado.

Quadro 2 – Características CAP 50/70

Penetração	70
Ponto de amolecimento	49 °C
Ponto de fulgor	334 °C
Densidade Relativa	1,00

Fonte: Adaptado de Boeira (2016)

Figura 12 – Ligante asfáltico



Fonte: Elaboração própria

3.1.2.1 Ensaio de viscosidade

A determinação da viscosidade do ligante é importante para conhecer a consistência ideal do CAP, e assim, possibilitando um bom cobrimento dos agregados da mistura (Bernucci *et al.*, 2008).

A viscosidade pode ser determinada através do método rotacional, que utiliza o viscosímetro Brookfield. Neste método, a viscosidade medida é a razão entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de cisalhamento de um líquido.

Boeira (2016) realizou o ensaio para o CAP 50/70 através do viscosímetro de Brookfield. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Ensaio de viscosidade CAP 50/70

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

Fonte: Adaptado de Boeira (2016)

3.1.3 Fibra de capimannoni

O capimannoni, vegetal abundante na região do pampa, apresenta uma elevada resistência à tração mecânica e baixa qualidade nutricional, apresentando-se assim, como uma boa alternativa de reforço nas misturas asfálticas. Essa planta, forma touceiras fortemente enraizadas, podendo alcançar, quando florescidas, 110 centímetros de altura (FOCHT, 2008).

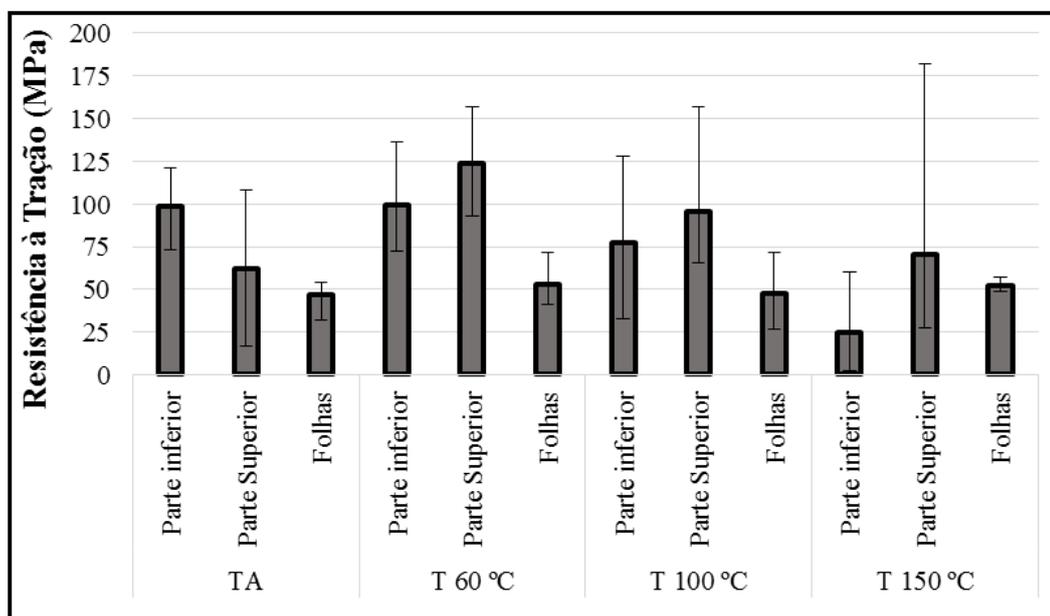
Junges (2016), realizou um estudo da fibra de capimannoni em diferentes temperaturas, para aplicação em misturas asfálticas, com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas e proporcionar maior durabilidade ao pavimento. Para realização dos ensaios, a fibra de capimannoni foi separada em três partes: inferior; superior; e a folha, desta forma, foi possível fazer uma análise da tensão de todas as partes da planta. A Figura 13 apresenta uma imagem do capimannoni, assim como os Gráficos 3 e 4 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração e o módulo de elasticidade da fibra de capimannoni.

Figura 13 – Capimannoni



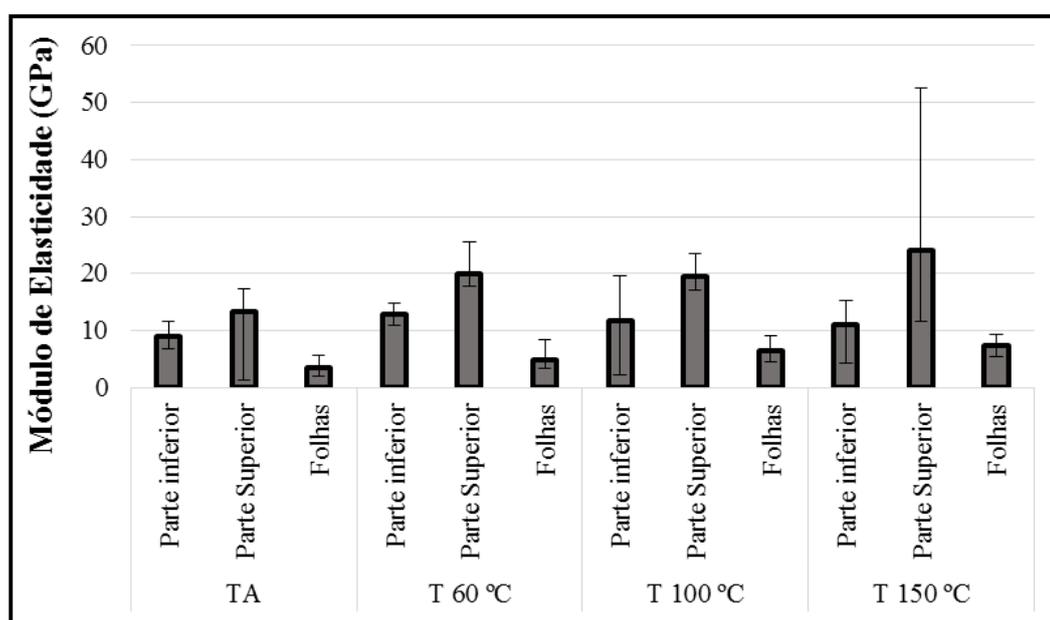
Fonte: Junges (2016, não paginado)

Gráfico 3 – Resistência à tração da fibra de capim annoni



Fonte: Junges (2016, não paginado)

Gráfico 4 – Módulo de elasticidade da fibra de capim annoni



Fonte: Junges (2016, não paginado)

Conforme os dados apresentados, o capim annoni possui, no geral, uma tensão de tração elevada e um bom módulo de elasticidade. Percebe-se, também, que a tensão média de tração diminui com o aumento da temperatura, e em relação as três partes da planta, a que apresentou menor resistência, em geral, foi a parte composta

pelas folhas, além disso a temperatura muito elevada na secagem das fibras resulta em perda de propriedades mecânicas. Por se tratarem de fibras vegetais, observa-se uma dispersão de valores entre as amostras ensaiadas, os resultados da barra de erros levam em conta os valores de máximos e mínimos obtidos dentre as amostras ensaiadas para cada situação (JUNGES, 2016).

Como não encontram-se referências de fibras vegetais em misturas asfálticas, no que diz respeito ao teor de fibras, foi adotado 0,5% e 1% de fibras, com comprimentos de 1 e 2 cm, tais valores são adotados como referência em estruturas de concreto convencional, além disso, outros valores maiores poderiam ser adicionados, porém, dificultariam no processo de mistura dos materiais devido ao grande volume de fibras. A Figura 14 apresenta a pesagem do capim annoni para composição de uma das misturas asfálticas reforçadas com 1% de fibra.

Figura 14 – Fibra de capim annoni



Fonte: Elaboração própria

3.2 Dosagem Marshall

A dosagem Marshall é regulamentada pela norma DNER-ME 043/95 no Brasil, este método foi criado durante a Segunda Guerra Mundial e continua sendo utilizado até os dias atuais (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Resumidamente, o procedimento do método Marshall foi realizado por compactação a quente, dentro de moldes cilíndricos metálicos que posteriormente foram armazenados ao ar livre. Foram compactados corpos de prova com a mistura de agregado e ligante asfáltico para a mistura referência (convencional) e agregados,

ligante asfáltico e fibra de capimannoni para a mistura reforçada. Os corpos de prova e as misturas asfálticas da metodologia Marshall foram também utilizados para obtenção dos parâmetros de dosagem (massa específica aparente, massa específica teórica e o volume de vazios).

O teor de ligante asfáltico pode ser relacionado com todos os parâmetros calculados, porém, para escolher o teor ótimo que será utilizado em camadas de rolamento de um pavimento, deve-se relacionar com o volume de vazios (V_v), o qual deve corresponder a 4%.

Como a temperatura ideal de mistura para o trabalho era de 146 °C, os agregados (já separados na quantidade certa para a dosagem e sem a adição das fibras) foram aquecidos em estufa a temperatura de 156 °C e o ligante em outra estufa a temperatura de 146 °C. Após, retirava-se os agregados da estufa e nessa hora eram acrescentadas as fibras para o caso das misturas reforçadas. Em seguida era retirado da estufa o ligante asfáltico, pesado e adicionado à mistura, então, homogeneizava-se a mesma até que todos agregados estivessem cobertos pelo ligante.

Para cada dosagem eram moldados três corpos de prova, assim, após a realização da mistura, separavam-se três porções de 1100 gramas que eram colocadas em recipientes de alumínio e deixadas na estufa por duas horas na temperatura de compactação (138 °C). Após esse período, cada porção era colocada em moldes cilíndricos metálicos e compactada no Compactador Marshall aplicando 75 golpes em cada superfície do corpo de prova. Por último, os corpos de prova eram desmoldados, medidos, pesados e armazenados para a realização dos ensaios.

A Figura 13 apresenta a sequência das atividades na realização das misturas asfálticas e na moldagem dos corpos de prova.

Figura 15 – Moldagem dos corpos de prova



Fonte: Elaboração própria

3.2.1 Massa específica aparente (Gmb)

O ensaio para obtenção da massa específica aparente da mistura compactada (Gmb) foi realizado de acordo com a norma do DNER 117/94. Onde esse parâmetro está diretamente relacionado com a razão entre a massa seca do corpo de prova e a massa do corpo de prova posteriormente submerso em água, à uma temperatura de 25 °C. Para o cálculo da Gmb foi utilizada a Equação 1:

$$Gmb = \frac{Ms}{Msss - Msss\ sub} * 0,9971 \quad \dots (1)$$

Onde:

- Ms, massa do corpo de prova seco;
- Msss, massa do corpo de prova na condição de superfície saturada seca;
- Msss sub, massa do corpo de prova submerso em água.

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.

Para realização do ensaio, pesou-se 1500 g de mistura asfáltica em um recipiente de massa conhecida (frasco Kitasato). Em seguida, o mesmo foi preenchido com água, até que toda a mistura ficasse submersa. Posteriormente, foi aplicada uma pressão de vácuo residual no recipiente por um período de aproximadamente 15 minutos, para que o ar existente entre os agregados recoberto com ligante fosse retirado. Por fim, após o período de vácuo, foi reestabelecida a pressão ambiente no recipiente, completado o volume com água à temperatura de 25 °C e pesado novamente. Para o cálculo da Gmm foi utilizada a Equação 2:

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

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.

3.2.3 Volume de vazios x teor ótimo de ligante

O teor ótimo de ligante asfáltico pode estar relacionado com vários parâmetros, porém para a escolha do teor que será utilizado nas camadas de rolamento de um pavimento asfáltico é ideal que este seja baseado apenas com o volume de vazios

(Vv), o qual deve corresponder a 4%. Para obtenção desse parâmetro foi utilizada a Equação 3:

$$Vv = \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} * 100 \quad \dots (3)$$

Onde:

- Gmm, massa específica máxima da mistura;
- Gmb, massa específica aparente da mistura.

3.3 Ensaio de adesividade – Lottman Modificado

O ensaio de adesividade – Lottman Modificado (AASTHTO T283-89 ou ASTM D4867) tem o objetivo de avaliar as propriedades de adesividade em misturas asfálticas considerando o efeito da água em amostras cilíndricas preparadas através do método Marshall com um volume de vazios entre 6 e 8%.

O ensaio consistiu na elaboração de oito corpos de prova (seguindo o método Marshall) para cada tipo de mistura, convencional e reforçada. Para encontrar o volume de vazios exigido pela metodologia Lottman, o número de golpes no Compactador Marshal foi reduzido à 23 golpes para a mistura convencional. Entretanto, como as misturas asfálticas reforçadas com fibras apresentaram um volume de vazios elevado, manteve-se a energia de compactação padrão de 75 golpes para estas misturas. Sendo assim, apenas as misturas com 0,5% de adição de fibras atingiram um volume de vazios de 8%, que é o limite ideal para realização do ensaio, já as misturas com adição de 1% de fibras obtiveram um volume de vazios em torno de 10%. Portanto, para uma melhor análise comparativa dos resultados, foi moldado também outra mistura convencional, com energia de compactação de 75 golpes e volume de vazios em torno de 4%.

Para realização do ensaio separaram-se as amostras em dois grupos, com quatro corpos de prova em cada. Para melhorar os resultados, os corpos de prova com dimensões mais próximas foram colocados em grupos diferentes conseguindo assim uma comparação mais precisa entre os resultados.

O primeiro grupo (Grupo 1) ficou armazenado dentro da estufa com temperatura constante de 25 °C durante 24 horas e então foram submetidos ao ensaio

de resistência à tração por compressão diametral. A média entre os valores encontrados para cada tipo de mistura foi denominada como Rt1.

No segundo grupo (Grupo 2) as amostras foram parcialmente saturadas (entre 60 e 80%) por pressão de vácuo, os corpos de prova então foram colocados em sacos plásticos e refrigerados durante 24 horas em temperatura de -18 °C. Após o término das 24h, as amostras foram removidas e imersas em água à temperatura de 60 °C por mais 24h, posteriormente foram transferidas para outra imersão a uma temperatura de 25 °C por mais 2h. Por fim, romperam-se os corpos de prova em câmara com temperatura controlada em 25°C e determinou-se o valor de Rt2.

Para determinar a resistência à tração (Rt1 ou Rt2), os corpos de prova foram submetidos a uma carga com velocidade constante de 0,8 mm/s. Após a ruptura do corpo de prova, foi obtida a força máxima resistida pela amostra e calculou-se a resistência conforme a Equação 4:

$$Rt = \frac{2 P}{\pi . d . h} \quad \dots (4)$$

Onde:

- P, força aplicada;
- d, diâmetro do corpo de prova;
- h, altura do corpo de prova.

A Figura 16 apresenta as etapas do processo de condicionamento que as amostras do segundo grupo foram submetidas.

Figura 16 – Etapas do condicionamento das amostras do segundo grupo



Fonte: Elaboração própria

Obtido os valores de resistências à tração por compressão diametral de ambos os grupos, calculou-se através do quociente entre R_{t2} e R_{t1} (em %) o valor da Resistência Retida à Tração (RRT), conforme a Equação 5:

$$RRT = \frac{R_{t2}}{R_{t1}} * 100 \quad \dots (5)$$

Onde:

- RRT, resistência retida à tração (%);
- R_{t1} , resistência à tração das amostras sem condicionamento;
- R_{t2} , resistência à tração das amostras com condicionamento.

A Metodologia Superpave recomenda utilizar o valor mínimo de 80% para o valor de RRT para classificar a adesividade entre ligante e agregado como adequada (SPECHT, 2004).

Nesse ensaio, os corpos de prova foram confeccionados no Laboratório de Solos e Pavimentação, refrigerados no Laboratório de Química, Metalografia e Tratamentos Térmicos e o restante das etapas foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil, todos na Universidade Federal do Pampa – Unipampa, campus Alegrete.

3.4 Perda de massa por desgaste – Ensaio Cantabro

O ensaio normatizado pelo DNER – ES 383/99, consistiu em submeter os corpos de prova (um por vez) de concreto asfáltico à 300 revoluções (33 rpm), dentro da máquina de abrasão Los Angeles (Figura 17), sem as esferas metálicas. A massa das amostras foi determinada antes e depois do ensaio e assim calculada a perda de massa por desgaste. Este ensaio avalia de maneira indireta a coesão, resistência à abrasão e a resistência à desagregação de misturas asfálticas. O valor aceitável segundo o DNIT é de 25% de perda de massa. A Figura 18 apresenta os corpos de prova após a realização do ensaio.

Após o ensaio, quantificou-se a perda de massa do corpo-de-prova. O desgaste da mistura betuminosa por abrasão, em percentagem, foi dado pela Equação 4:

$$PM = \frac{P - P'}{P} * 100 \quad \dots (6)$$

Onde:

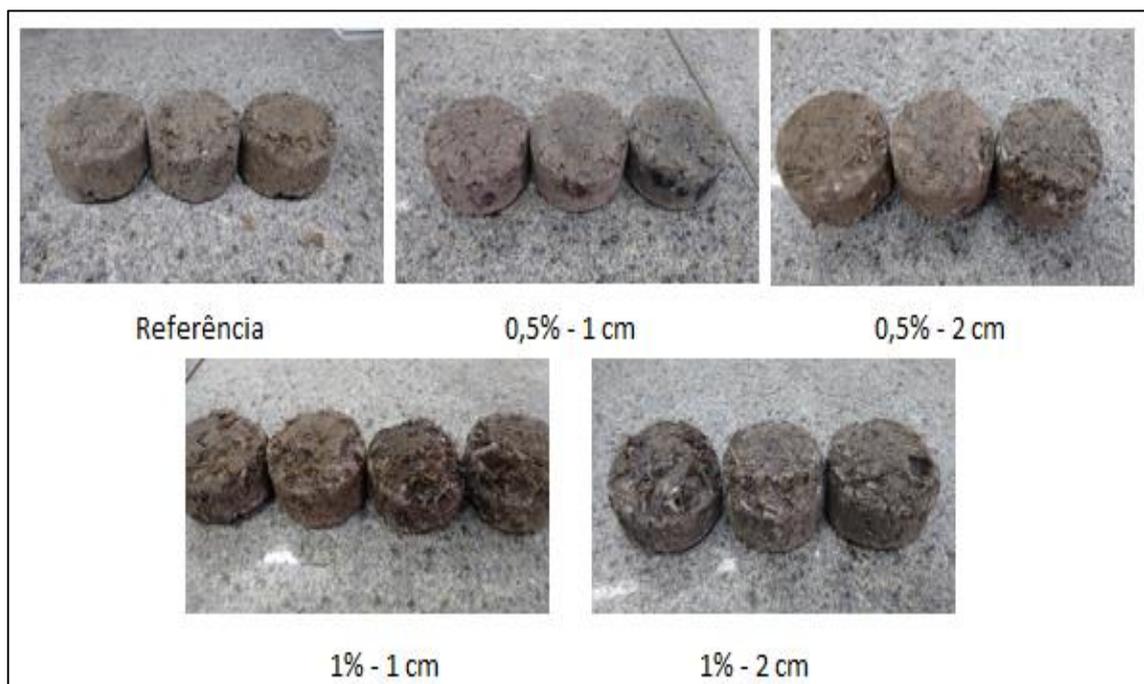
- PM, perda de massa no ensaio de desgaste - Cantabro (%);
- P, massa inicial do corpo-de-prova (g);
- P', massa após a realização do ensaio (g).

Figura 17 – Equipamento de abrasão Los Angeles



Fonte: Elaboração própria

Figura 18 – Corpos de prova após a realização do ensaio



Fonte: Elaboração própria

Nesse ensaio, os corpos de prova foram confeccionados no Laboratório de Solos e Pavimentação e ensaiados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Pampa – Unipampa, campus Alegrete.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados provenientes dos parâmetros de dosagem da mistura convencional e dos ensaios de Adesividade (Lottman Modificado) e perda de massa por desgaste (Cantabro).

4.1 Parâmetros de dosagem da mistura convencional

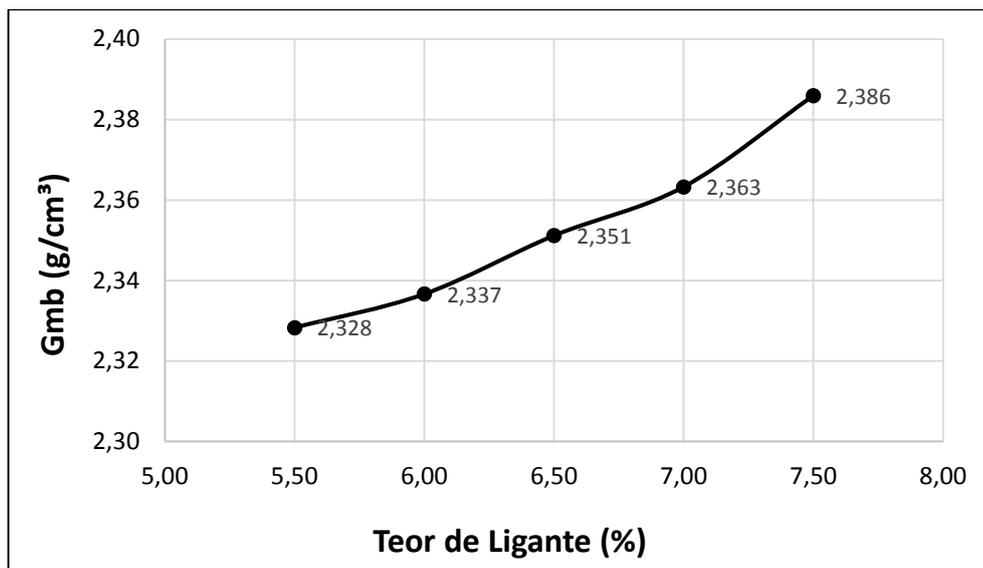
A Tabela 5 apresenta a relação dos resultados obtidos após a realização do ensaio de Massa Específica Aparente (Gmb) e Massa Específica Máxima (Gmm) detalhados no item 3.2.1 e 3.2.2 da metodologia, os mesmos foram calculados conforme as Equações 1 e 2. Os Gráficos 5 e 6 apresentam esses valores para uma melhor análise.

Tabela 5 – Massa específica aparente e máxima da mistura convencional

Teor de Ligante (%)	Gmb Média (g/cm³)	Gmm Média (g/cm³)
5,5	2,328	2,499
6	2,337	2,478
6,5	2,351	2,464
7	2,363	2,450
7,5	2,386	2,446

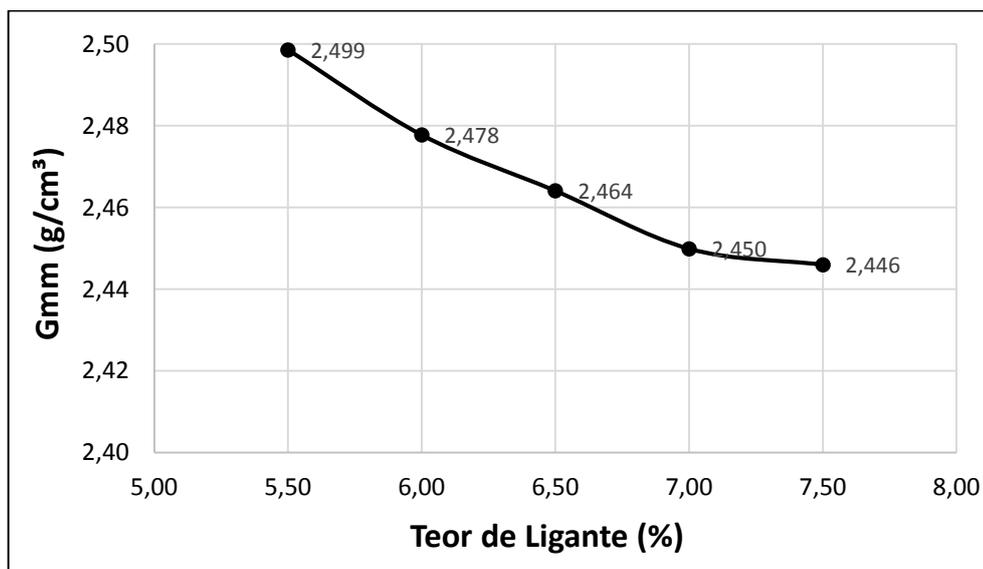
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 5 – Massa específica aparente da mistura convencional



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 6 – Massa específica máxima da mistura convencional



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.

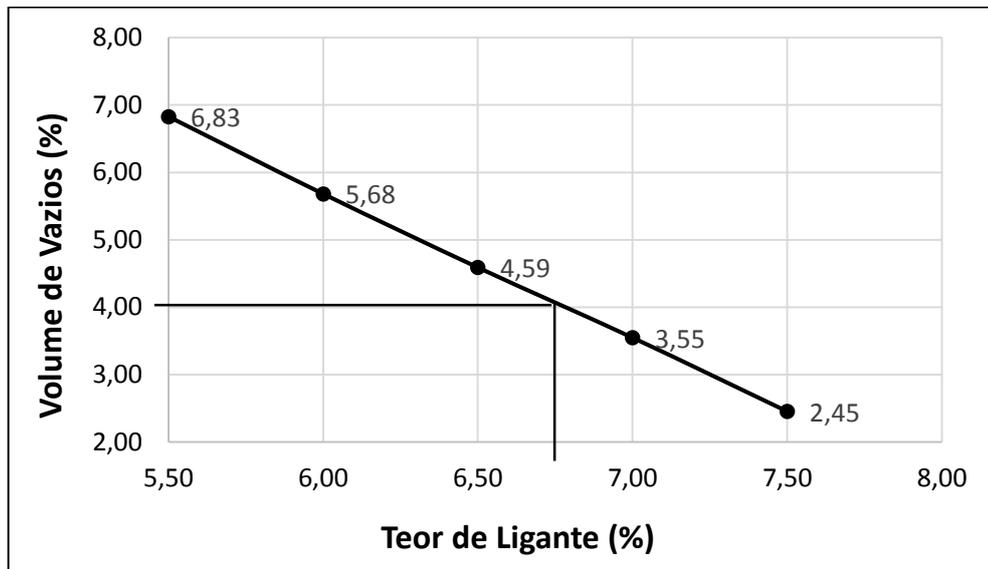
A Tabela 6 apresenta os valores de volume de vazios de cada teor de ligante. Já o Gráfico 7 apresenta a relação entre o volume de vazios e o teor de ligante das misturas a fim de definir o teor ótimo especificado no item 3.2.3 da metodologia.

Tabela 6 – Volume de vazios dos CPs da mistura convencional

% de Ligante	Gmm (g/cm ³)	Gmb (g/cm ³)	Vv (%)
5,5	2,499	2,328	6,83
6,0	2,478	2,337	5,68
6,5	2,464	2,351	4,59
7,0	2,450	2,363	3,55
7,5	2,446	2,386	2,45

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 7 – Teor ótimo de ligante da mistura convencional



Fonte: Elaboração própria

Pode-se observar que o teor ótimo de ligante da mistura convencional que corresponde um volume de vazios de 4% foi de aproximadamente 6,75%. Este foi o teor de ligante utilizado para moldagem dos corpos de prova que foram utilizados para a realização dos demais ensaios do trabalho.

Avaliou-se ainda, através de uma adaptação do ensaio de Rotarex, a percentagem de ligante que as fibras de capimannoni absorvem, designando se havia necessidade de um acréscimo da quantidade de ligante para execução das misturas reforçadas. A Figura 19 apresenta parte dos procedimentos para realização do ensaio e os resultados estão apresentado na Tabela 7.

Figura 19 – Determinação da absorção de ligante pelas fibras



Fonte: Elaboração própria

Tabela 7 – Absorção de ligante pelas fibras

% Ligante	Média das amostras				
	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Agregado (g)	Capim (g)	Absorção capim (%)
6,50	39,71	33,69	28,33	5,37	2,41
7,00	20,39	17,43	13,71	3,72	3,10

Fonte: Elaboração própria

Pode-se observar que a absorção de ligante pelas fibras pode ser desconsiderada perante os agregados. Desta forma, adotou-se a mesma percentagem de ligante para ambas as misturas, convencional e reforçadas.

4.2 Adesividade – Metodologia Lottman Modificada

Como já dito anteriormente no item 3.3 da metodologia, os corpos de prova de cada mistura foram separados em dois grupos, um para que passasse pelo ciclo de condicionamento e outro em condições naturais.

Nas Tabelas 8 e 9 estão apresentados os valores de resistência à tração por compressão diametral (R_t) de cada grupo, obtidos através da Equação 4 após a realização do ensaio das amostras e o Gráfico 8 apresenta o comparativo entre as resistências médias de cada grupo das misturas asfálticas.

Tabela 8 – Grupo 1: Rt das amostras sem condicionamento

Mistura	CPs	Rt1 (Mpa)	Rt1 Média (Mpa)
Referência	1	1,16	1,19
	2	1,17	
	3	1,17	
	4	1,26	
Lottman	1	1,06	1,03
	2	1,08	
	3	1,06	
	4	0,92	
0,5% - 1 cm	1	1,34	1,07
	2	1,00	
	3	0,90	
	4	1,02	
0,5% - 2 cm	1	1,39	1,34
	2	1,14	
	3	1,45	
	4	1,39	
1% - 1 cm	1	1,02	1,01
	2	0,83	
	3	1,16	
	4	1,02	
1% - 2 cm	1	1,59	1,25
	2	1,17	
	3	1,09	
	4	1,15	

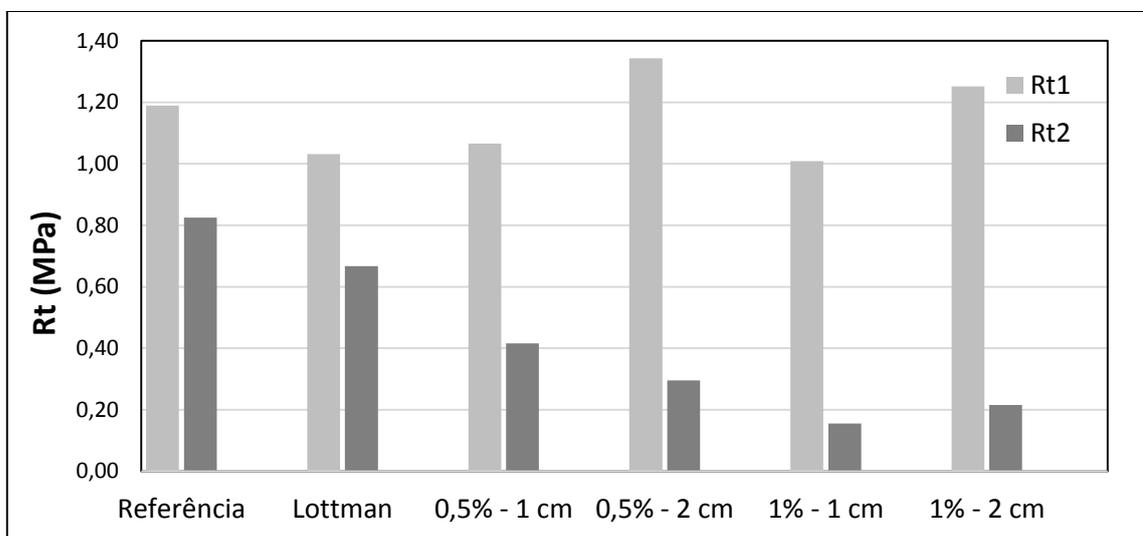
Fonte: Elaboração própria

Tabela 9 – Grupo 2: Rt das amostras com condicionamento

Mistura	CPs	Rt2 (Mpa)	Rt2 Média (Mpa)
Referência	1	0,83	0,82
	2	0,78	
	3	0,85	
	4	0,84	
Lottman	1	0,61	0,67
	2	0,72	
	3	0,63	
	4	0,71	
0,5% - 1 cm	1	0,46	0,42
	2	0,29	
	3	0,39	
	4	0,52	
0,5% - 2 cm	1	0,24	0,29
	2	0,24	
	3	0,45	
	4	0,25	
1% - 1 cm	1	0,20	0,15
	2	0,11	
	3	0,18	
	4	0,12	
1% - 2 cm	1	0,25	0,22
	2	0,14	
	3	0,29	
	4	0,18	

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 8 – Rt média dos grupos de cada mistura asfáltica



Fonte: Elaboração própria

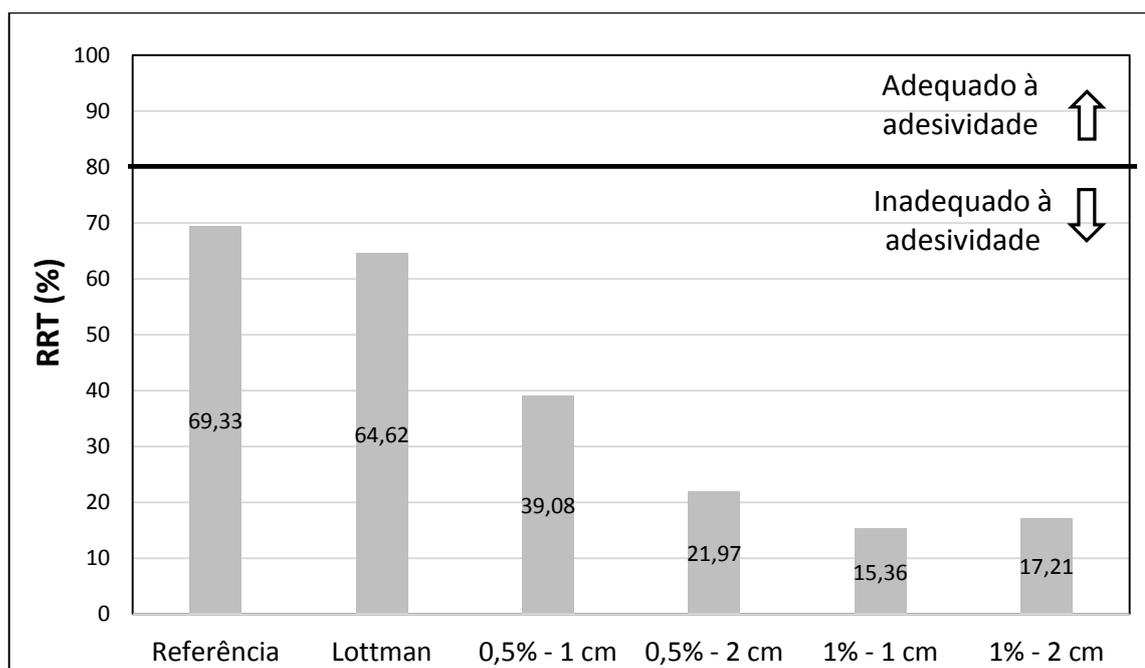
Com os resultados dos dois grupos, conforme apresentado, foi possível calcular os valores de RRT para os corpos de prova convencionais e reforçados com fibras utilizando a Equação 5. Os resultados estão apresentados na Tabela 10 e no Gráfico 9 para uma melhor análise comparativa entre as misturas.

Tabela 10 – Valores finais de Rt1, Rt2 e RRT

Mistura	Rt1 (Mpa)	Rt2 (Mpa)	RRT (%)
Referência	1,19	0,82	69,33
Lottman	1,03	0,67	64,62
0,5% - 1 cm	1,07	0,42	39,08
0,5% - 2 cm	1,34	0,29	21,97
1% - 1 cm	1,01	0,15	15,36
1% - 2 cm	1,25	0,22	17,21

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 9 – Resistência Retida à Tração – RRT



Fonte: Elaboração própria

Como pode ser visto, nenhuma das misturas obteve valores de RRT maiores que 80%, que segundo a Metodologia Superpave é o valor que define se o pavimento é adequado em relação à adesividade. Até mesmo as misturas de referência obtiveram uma adesividade entre ligante e agregado deficiente, o que define que alguma medida deve ser tomada para a correção desses valores.

Observa-se também que as misturas reforçadas com fibras obtiveram valores de RRT bem inferiores em relação as misturas convencionais, porém, não diferiram muito os valores entre si. Nota-se também que os valores de resistência diminuí conforme volume de fibra na mistura asfáltica, devido ao elevado volume de vazios de vazios dos corpos de prova.

4.3 Perda de massa – Metodologia Cantabro

A Tabela 11 apresenta os valores de perda de massa encontrados para cada tipo de mistura estudada através da Equação 6. Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada tipo de mistura, exceto para a mistura reforçada com 1% de fibra de 1 cm de comprimento, onde uma das amostras obteve uma dispersão nos resultados muito grande e precisou ser descartado, totalizando assim 16 amostras ensaiadas.

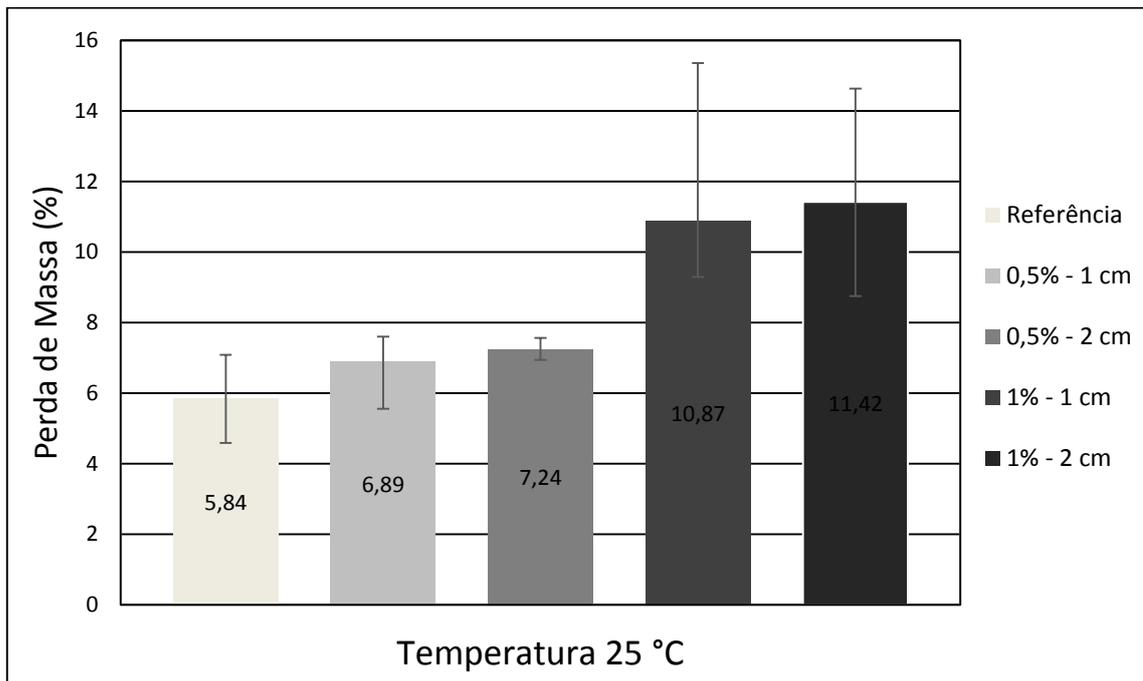
Tabela 11 – Resultados de perda de massa

Mistura	PM Média (%)	Desvio Padrão (%)	Coef. de Variação (%)
Referência	5,84	1,25	21,41
0,5% - 1 cm	6,89	1,16	16,78
0,5% - 2 cm	7,24	0,31	4,34
1% - 1 cm	10,87	4,19	38,57
1% - 2 cm	11,42	2,98	26,05

Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 10 apresenta um comparativo entre os valores de perda de massa encontrados para cada mistura. Observa-se que todas as misturas ensaiadas obtiveram valores dentro da faixa aceitável pelo DNIT, o qual é até 25%. Nota-se também que perda de massa das amostras vai aumentando conforme a quantidade de fibras nas misturas, porém, uma variação muito pequena se comparado com o limite estipulado pelo DNIT.

Gráfico 10 – Perda de massa



Fonte: Elaboração própria

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões desta pesquisa, que teve como objetivo geral verificar as propriedades de adesividade e perda de massa de misturas asfálticas convencionais e reforçadas com fibras de capimannoni.

5.1 Conclusões

Na pesquisa realizada, o principal objetivo era analisar os efeitos da adição de fibras de capimannoni na camada de revestimento de pavimentos flexíveis, verificando se ocorreria melhora do desempenho relacionado à adesividade e na perda de massa por desgaste. Para realização dos ensaios do estudo, foram moldados cerca de 75 corpos de prova, subdivididos entre as misturas asfálticas estudadas (referência, 0,5% de 1 e 2 cm e 1% de 1 e 2 cm).

Após a realização do ensaio de adesividade, verificou-se que as misturas ensaiadas, até mesmo as de referência, não apresentaram bom desempenho, ficando classificadas como inadequadas à adesividade. As razões para isso ter ocorrido, pode relacionado com a qualidade e as propriedades dos agregados ou do ligante, o que pode ser corrigido com a utilização de melhoradores de adesividade na composição. Pode-se observar também, que os valores de resistência retida à tração foram diminuindo conforme a variação do comprimento e volume de fibras das misturas reforçadas, pois, de certa forma, não foi possível obter uma avaliação mais precisa da adesividade destas misturas, uma vez que, o alto volume de vazios influencia diretamente nos efeitos da água sobre os corpos de prova, resultando na má adesividade entre os materiais de composição da mistura asfáltica.

No outro ensaio realizado, para verificação da resistência ao desgaste, todas as misturas ensaiadas apresentaram resultados satisfatórios, ou seja, dentro dos limites aceitáveis para o ensaio, o qual é de 25% de perda de massa. Entretanto, as misturas reforçadas com fibras apresentaram valores de desgaste um pouco superiores aos da mistura asfáltica de referência, porém, tal diferença pode ser considerada muito pequena se comparada com os limites para o ensaio.

Portanto, diante dos dados apresentados, pode-se concluir que a adição de fibras de capimannoni em misturas asfálticas apresentou resultados satisfatórios.

Onde, em relação ao ensaio de resistência ao desgaste os resultados forma muito equivalente com a mistura de referência, já no ensaio de adesividade, devido ao alto volume de vazios dos corpos de prova e o baixo desempenho de adesividade das misturas de referência, não se pode avaliar sua influência com precisão. Outros ensaios devem ser avaliados antes de se ter uma conclusão definitiva à respeito da viabilidade de adição de fibras de capimannoni em misturas asfálticas, como por exemplo, o ensaio de vida de fadiga. Deve-se continuar realizando pesquisas à respeito da utilização de fibras como reforço em misturas asfálticas, uma vez que esse estudo não apresenta muitos resultados e existem diversos tipos de fibras disponíveis para serem aplicadas, e com isso, criar um bom acervo bibliográfico e se ter uma conclusão mais precisa sobre o assunto.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como o estudo com adição de fibras em misturas asfálticas ainda pode ser considerado pioneiro, é de grande importância que se realizem diferentes pesquisas para que se possam verificar outros fatores relacionados ao uso de fibras nos pavimentos. Dentre essas pesquisas, pode-se citar:

- Utilizar um compactador giratório para comparação dos volumes de vazios;
- Avaliar a utilização de diferentes tipos de ligante e agregados;
- Utilizar outros tipos de fibras;
- Verificar outros métodos de incorporação de fibras em misturas asfálticas;
- Realizar pequenos trechos experimentais com misturas reforçadas com fibras para verificar o seu desempenho quando solicitado ao tráfego real.
- Realizar misturas reforçadas em usina asfáltica, para verificar se o processo de incorporação das fibras seria eficaz na prática.

REFERÊNCIAS

ADUATI, M. H. F. **Análise dos efeitos de fibras de polipropileno na adesividade e vida de fadiga em misturas asfálticas.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

ALFAYA, H. **Efeito da amonização com uréia sobre os parâmetros de qualidade do feno do capim-annoni 2 (Eragrostis plana Nees).** In: Revista Brasileira de Zootecnia, 2002.

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 escorrimento em misturas asfálticas do tipo SMA com fibras de polipropileno,** Ceará, 2008.

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

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementious Composites.** Elsevier Applied Science, London and New York, 1990.

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

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

BUDNY, J. **Avaliação dos efeitos de diferentes tipos de cal em misturas de concreto asfáltico.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2009.

CARNEIRO, L. A. V. **Reforço de vigas e pilares de concreto com materiais compósitos de resina e fibras**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

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. **Pesquisa CNT de rodovias 2016**, 2016. Disponível em <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>>. Acesso em 11 novembro 2016.

CORÓ, A. G. **Investigação das propriedades mecânicas de concretos reforçados com fibras PET**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2002.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - PRO 010/79. **Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis**, 1979.

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

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

DNER - ME 083/98. **Agregados – análise granulométrica**, 1998.

DNER - ME 117/94. **Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente**, 1994.

DNER - ME 194/98. **Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman**, 1998.

DNER - ME 383/99. **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com Asfalto-Polímero – Ensaio Cantabro**, 1999.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE 031/2006 - ES. **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**, 2006.

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

DNIT. **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 (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade da Amazônia, 2011.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibra de polipropileno**. Tese (Doutorado 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.

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

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

FURLAN, A. P. **Condições acerca da adesão e da susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

HECK, A. F. **Análise da viabilidade do uso de fibras de polipropileno como material de reforço em pavimentos asfálticos.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

HOMEM, T. R. **comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

JUNGES, L. B. **Estudo da resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra de capim anonni.** In: Anais do 8º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão – Universidade Federal do Pampa, Uruguaiana, 2016.

MACCAFERRI. **Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto,** 2009. Disponível em: <<http://www.maccaferri.com.br/downloads/manuais-tecnicos/16429-1.html>>. Acesso em 17 outubro 2016.

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. *et al.* **Solicitação de carga em movimento no pavimento em concreto asfáltico.** In: 1º International Seminar of Weigh in Motion, Florianópolis, SC, 2011.

NUNES, N. L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

OLIVEIRA FILHO, C.; SOARES, J. B. **Melhoradores de Adesividade, Ligantes Modificados e Intertravamento.** In: XX ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Brasília, 2006.

QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

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

SANTOS, A. P. S. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra sob compressão confinada com medição lateral.** Tese (Mestrado em Engenharia) – 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 em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SILVA, M. B. **Caracterização de mistura de alto desempenho tipo SMA e avaliação do processo executivo em pista experimental no Estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SOUZA, M. V. R. **Efeito de fibras sintéticas nas propriedades de ligantes e concretos asfálticos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SPECHT, L. P. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SPECHT, L. P. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

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. **Estudo laboratorial da viabilidade do uso de fibras de coco em misturas asfálticas do tipo SMA.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2007.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.