



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS

FACULDADE DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



**REFORÇO DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO POR MEIO DE GEOGRELHA
FABRICADA COM FIBRA DE JUTA**

ABEL DE OLIVEIRA COSTA FILHO

MANAUS

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ABEL DE OLIVEIRA COSTA FILHO

**REFORÇO DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO POR MEIO DE GEOGRELHA
FABRICADA COM FIBRA DE JUTA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Professor D.Sc. Nilton de Souza Campelo

MANAUS

2019

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

C837f Costa Filho, Abel de Oliveira
Reforço de Revestimento Asfáltico por meio de geogrelha fabricada com fibra de juta : Estudo de uma proposta para o reforço de pavimento asfáltico por meio do uso de geogrelha de fibras de juta - Manaus/AM / Abel de Oliveira Costa Filho . 2019
88 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Nilton de Souza Campelo
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Fibra de juta. 2. Geogrelha. 3. Camada asfáltica. 4. Pavimentação. 5. Cidade de Manaus. I. Campelo, Nilton de Souza. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

Ao meu Deus, por guiar meu caminho sempre;
Aos meus pais, por serem minha força, para a
luta diária com a vida, e também pelo esforço e
sacrifício deles, a fim de me proporcionar o
maior dos tesouros: A educação!

À Fernanda, esposa, amiga e parceira. Este
triunfo também é teu, sem você nada disso seria
realidade.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter proporcionado à minha pessoa alcançar este nível singular na jornada do conhecimento, agora na pós-graduação stricto sensu;

Ao meu orientador professor, Sr. Nilton de Souza Campelo, um exemplo de vida, uma pessoa que me brindou toda confiança e respeito para o desenvolvimento desta pesquisa. Por meio de suas conquistas, sempre inspira seus orientados a chegarem tão longe quanto ele. Um dos maiores orgulhos da Universidade Federal do Amazonas;

Ao meu pai, que nesses dois anos sempre me apoiou e não me deixou desfalecer. Suas palavras e seu exemplo de vida me inspiraram para chegar onde estou. Lembro-me de suas palavras *“jamais se esqueça de lutar pelas causas justas; sem importar qual o lugar e o tamanho do adversário”*. Para o senhor, todo o meu carinho, meu respeito e minha admiração;

À minha mãe, por me ensinar o valor do amor, do respeito e da bondade. Os dois anos que ficamos distantes, não impediram que fôssemos os mesmos parceiros de sempre! Mãe, a saudade e a distância não impediram que nós sempre estivéssemos juntos. Para a senhora, todo o meu respeito, meu carinho e minha admiração;

À Fernanda, esposa e companheira. A tua força, a tua ajuda, o teu carinho e a tua compreensão, ajudaram-me a alcançar as maiores conquistas de minha vida;

Ao professor Dr. João Almeida, pela ajuda na realização deste trabalho. Tenho muito respeito e muita admiração pelo senhor;

Aos membros desta banca, professor Dr. Genilson Santana (Dep. Química/UFAM) pela assistência na qualificação do mestrado, e ao estimado professor Dr. Francisco Rocha (EST/UEA), homem íntegro, professor desde minha graduação.

Ao nobre representante do DNIT Sr. Evalton Arantes, pela ajuda e colaboração, sempre disponível tanto quando estava em Manaus ou quando estava em Portugal, meu muito obrigado;

Às amigas da jornada Maria Henriqueta e Virlane Reis, pessoas maravilhosas, que sempre ofereceram suas amizades sem esperar nada em troca;

Ao estimado parceiro José Barroso Braga, pela disposição mesmo estando enfermo em me receber em sua casa para ajudar na idéia de confeccionar a geogrelha usando a fibra de juta;

Aos senhores técnicos do Laboratório de Pavimentação LABPAV, Zeca e Reinaldo, pela ajuda na elaboração de algumas peças para a realização dos ensaios desta dissertação. Sem a ajuda de vocês não seria possível o desenvolvimento deste trabalho;

Agradeço também a FAPEAM, pelo apoio financeiro prestado.

“A sabedoria vem das mãos”.

Milton Vargas (1914-2011).

“Apresentei minhas teorias e fiz meus experimentos com o propósito de estabelecer uma ajuda para formar uma opinião correta e percebi, com horror, que eles ainda são considerados pela maioria como substitutos do bom senso e da experiência”.

Karl Terzaghi (1883-1963).

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil (M.Sc.).

REFORÇO DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO POR MEIO DE GEOGRELHA
FABRICADA COM FIBRA DE JUTA

Abel de Oliveira Costa Filho

Orientador: Prof. Nilton de Souza Campelo, D.Sc.

O desígnio principal de uma estrutura de pavimento é garantir a trafegabilidade em qualquer época do ano e sob qualquer condição climática, proporcionando aos usuários conforto e segurança. O controle da reflexão de trincas em pavimentos é fundamental para o bom desempenho funcional e estrutural da via, bem como para a eficácia econômica da restauração do pavimento. Neste contexto, a aceitação do sistema de restauração com geogrelha de fibra natural de juta precisa ser estendida, pois a mesma exerce uma excelente alternativa para o controle de trincas na camada asfáltica. Neste trabalho apresentam-se os principais benefícios estruturais que tem trazido a inclusão das geogrelhas em obras de pavimentação asfáltica, dentro de um enfoque técnico-econômico. Nesta dissertação é apresentada uma proposta para o reforço de pavimento asfáltico com uma geogrelha manufaturada com fibra natural de juta. Através disto, verificamos o emprego deste material para evitar a reflexão de trincas entre um revestimento antigo e uma capa asfáltica nova. Para avaliar a reflexão de trincas foram ensaiados corpos de prova preparados com mistura asfáltica e geogrelha com fibra natural de juta. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de umidade induzida e também foi realizado a caracterização da fibra de juta em estudo, dentre outros ensaios aqui realizados foi realizado os ensaios de Marshall e puchamento de fibra em uma caixa de pequeno porte simulando a camada asfáltica com o intuito de provar sua resistência e a durabilidade do pavimento asfáltico. Com o resultado dos ensaios, obteve-se que a presença de geogrelha de fibra de juta pode ser incorporada em camada asfáltica, com isso a geogrelha de fibra de juta pode evitar a reflexão de trincas da camada inferior para a camada superior e aumenta a vida útil e resistência da camada.

Palavras-chave: Fibra de juta; geogrelha; camada asfáltica; cidade de Manaus.

ABSTRACT

Summary of the Dissertation presented to the Graduate Program in Civil Engineering of the Federal University of Amazonas as part of the requirements for obtaining the degree of Master in Civil Engineering (M.Sc.).

REINFORCEMENT OF ASPHALT COATING THROUGH GEOGRAPHY MADE WITH JUTE FIBER

Abel de Oliveira Costa Filho

Supervisor: Prof. Nilton de Souza Campelo, D.Sc.

The main purpose of a pavement structure is to guarantee traffic at any time of the year and under any climatic condition, providing users with comfort and safety. The control of the reflection of cracks in pavements is fundamental for the good functional and structural performance of the road, as well as for the economic effectiveness of pavement restoration. In this context, the acceptance of the restoration system with natural jute fiber geogrid should be extended, as it provides an excellent alternative for the control of cracks in the asphalt layer. This paper presents the main structural benefits of including geogrids in asphalt paving works, within a technical-economic approach. This dissertation presents a proposal for the reinforcement of asphalt pavement with a geogrid manufactured with natural jute fiber. The use of this material was verified to avoid the reflection of cracks between an old coating and a new layer of asphalt. In order to evaluate the reflection of cracks, specimens prepared with asphalt mixture and natural jute fiber geogrid were tested. The specimens were subjected to induced moisture tests and the jute fiber under study was also characterized, Marshall's tests and fiber punching were performed in a small box simulating the asphalt layer in order to prove its strength and the durability of the asphalt pavement. With the results of the tests, it was obtained that the presence of a jute fiber geogrid can be incorporated in an asphalt layer, with that the jute fiber geogrid can prevent the reflection of cracks from the lower layer to the upper layer and increases the life usefulness and resistance of the layer.

Keywords: Jute fiber; geogrid; asphalt layer; city of Manaus.

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	13
1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	13
2.0 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3.0 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	16
4.0 JUSTIFICATIVA	17
5.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
5.1 GEOGRELHAS EM PAVIMENTAÇÃO.....	17
5.1.1 Generalidades	17
5.1.2 Mecanismos de atuação das geogrelhas	18
5.1.3.1 Geogrelha	20
5.1.3.2 Geogrelha de fibra de juta	21
5.1.4 Geocompostos em pavimentação	22
5.1.5 Emprego de geogrelha de fibras de juta em reflexão de trincas.....	23
5.2 RUPTURA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	28
5.2.1 Fadiga em misturas asfálticas	28
5.3 TRINCAS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	30
5.3.1 Generalidades	30
5.3.2 Classificação das trincas.....	31
5.3.3 Reflexão de trincas	32
5.4 FIBRAS VEGETAIS.....	32
5.4.1 Classificação.....	32
5.4.2 Propriedades Mecânicas	32
5.4.3 Estrutura.....	33
5.4.4 Composição das fibras lignocelulósicas.....	34
5.4.5 Propriedades Físicas	36
5.5 FIBRA DE JUTA.....	37
6.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
6.1 SELEÇÃO E COLETA DE MATERIAIS.....	39
6.1.1 Fibras de juta	39

6.1.2	Análise Termogravimétrica (Tg)	39
6.1.3	Materiais para elaboração de misturas asfálticas.....	40
6.1.4	Materiais granulares	40
6.1.5	Cimento asfáltico	40
6.1.6	Cimento Portland.....	41
6.1.7	Areia	41
6.1.8	Verniz	41
7.0	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	42
7.1	AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA	42
7.1.1	Granulometria por peneiramento.....	42
7.1.2	Avaliação da textura e forma das partículas.....	43
7.1.3	Índice de forma.....	44
7.1.4	Partículas fraturadas	44
7.1.5	Angularidade da Areia.....	45
7.1.6	Avaliação da limpeza do material	45
7.1.7	Dureza do material	45
7.1.8	Dosagem Marshall.....	46
7.1.9	Ensaio Cântabro.....	47
7.1.10	Ensaio de Umidade Induzida.....	47
7.1.11	Resistência à tração por compressão diametral	49
7.1.12	Microscopia das geogrelhas.....	50
7.1.13	Ensaio de arrancamento.	51
8.0	GEOGRELHA EMPREGADA.....	57
8.1	GEOGRELHA DE FIBRA DE JUTA.....	57
9.0	RESULTADOS DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E DOSAGEM DE MATERIAL	58
9.1	Avaliação da granulometria.....	58
9.2	Avaliação da textura e forma das partículas.....	59
9.3	Avaliação da limpeza do material	60
9.4	Avaliação da dureza dos materiais	61
9.5	Caracterização física do cimento asfáltico	61
9.6	Caracterização da areia	62
9.7	Avaliação do teor ótimo de cimento asfáltico	64

9.8 Método de dosagem marshall	64
9.09 Ensaio de microscopia da geogrelha	68
9.10 Ensaio de umidade induzida	68
9.11 Ensaio da resistência à tração por compressão diametral.....	69
9.12 Ensaio cântabro.....	70
9.13 Ensaio de arrancamento de geogrelha natural de fibra de juta	70
10.0 TRECHO EXPERIMENTAL.....	74
10.1 LOCALIZAÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL.....	74
11.0 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	75
11.1 CONCLUSÕES.....	74
11.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Propriedades mecânicas	33
Tabela 2 Composição química de fibras.....	36
Tabela 3 Propriedades físico-químicas do verniz.....	41
Tabela 4 Faixas granulométricas base melhorada com cimento, (DNER 142/2010 ES).....	43
Tabela 5 Faixas granulométricas concreto asfáltico (norma DNIT 031/2006 ES).....	43
Tabela 6 Granulometria dos materiais para confecção da mistura asfáltica.....	58
Tabela 7 Resultados da avaliação de textura e forma.....	60
Tabela 8 Resultados dos ensaios da avaliação de limpeza.....	60
Tabela 9 Resultados de ensaios de Abrasão Los Angeles.....	61
Tabela 10 - Caracterização física do cimento asfáltico CAP 50 – 70.....	61
Tabela 11 Ensaio de Densidade Bulk - corpos de prova marshall.....	64
Tabela 12 Resultados do ensaio densidade máxima medida.....	66
Tabela 13 Resultados do ensaio de estabilidade e fluência marshall.....	66
Tabela 14 Resultados dos corpos de prova Marshall.....	67
Tabela 15 Especificação DNIT 031/2006.....	68
Tabela 16 Resultados do Ensaio Cantabro para a mistura em estudo.....	70
Tabela 17 Características do ensaio de variação de velocidade.....	71
Tabela 18 Resultado valores de Anova	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estágios existentes num processo de fadiga.....	30
Figura 2 Estrutura da fibra natural.....	34
Figura 3 Micrografias eletrônicas de varredura.....	36
Figura 4 Ciclo de extração da juta.....	37
Figura 5 Crivo redutor e peneira circular para ensaio de índice de forma.....	38
Figura 6 Máquina de ensaio Marshall - UFAM.....	44
Figura 7 Corpos de prova de ensaio Cântabro e máquina de ensaio Cântabro.....	46
Figura 8 Corpos de provas emergidos em água e corpos de provas em pressão de vácuo.....	47
Figura 9 Prensa Marshall – UFAM.....	49
Figura 10 Estereoscópio para ensaio e imagem.....	49
Figura 11 Equipamento reduzido de laboratório.....	51
Figura 12 Borracha que inflável.....	52
Figura 13 Equipamento reduzido de laboratório e Compressor de ar.....	53
Figura 14 Tampa com borracha inflável para simular a tensão confinante do solo.....	54
Figura 15 Ensaio de Arrancamento de geogrelha.....	55
Figura 16 Geogrelha de fibra natural de juta.....	56
Figura 17 Curvas granulométricas Brita 0, Brita 1, Pó de Pedra e Material Misturado.....	57
Figura 18 Gráfico da curva granulométrica da areia.....	59
Figura 19 Gráfico do peso específico Bulk (g/cm^3).....	63
Figura 20 Gráfico do resultado de TG da fibra de Juta.....	64
Figura 21 Gráfico do peso específico Bulk (g/cm^3).....	65
Figura 22 Etapas para ensaio Marshall.....	66
Figura 23 Volume de vazios dos corpos de prova para o ensaio de umidade induzida.....	69
Figura 24 Ensaio de RT por compressão diametral.....	69
Figura 25 Representação de Força de arrancamento pela velocidade aplicada.....	72
Figura 26 Ensaio de arrancamento.....	73
Figura 27 Trecho experimental.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

% VAM	Volume de vazios
% V _v	Teor de umidade
% W	Associação brasileira de normas técnicas
ABNT	<i>American society for testing and materials</i>
ASTM	Largura
B	Cimento asfáltico de petróleo
CAP	Concreto betuminoso usinado em quente
CBUQ	Coefficiente de curvatura
C _c	Centímetro
cm	Confederação nacional do transporte
CNT	Dióxido de carbono
CO ₂	Conselho nacional do meio ambiente
Conama	Centipoise
c _p	Coefficiente de uniformidade
C _U	Departamento nacional de estradas de rodagem
DNER	Departamento nacional de infraestrutura de transporte
DNIT	Especificação de serviço
ES	Índice de forma
f	Trincas cujas aberturas são menores que 1,0 mm
FC-1	Trincas cujas aberturas são superiores a 1,0 mm, sem erosão nas bordas
FC-2	Trincas cujas aberturas são superiores a 1,0 mm, com erosão nas bordas
FC-3	Trincas cujas aberturas são superiores a 1,0 mm, com erosão nas bordas
f _{ct}	Resistência à tração na flexão
FE	Fator de eficiência viga sem reforço
FE _G	Fator de eficiência viga reforçada
g	Gramas
g/cm ³	Gramas/centímetro cúbico

1.0 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

O setor de transportes é mundialmente conhecido como atuante indutor de grandes riquezas, desenvolvimento e progresso, além de ser o grande responsável pela integração entre áreas de produção e consumo, tanto no mercado interno como externo. Nesse contexto, o transporte de cargas no Brasil é altamente dependente do modal rodoviário e conseqüentemente dos combustíveis conhecidos como fósseis, episódio que torna o meio de transporte um importante consumidor de energia e, por conseguinte, um dos fundamentais emissores de gás carbônico (CO₂).

Os investimentos na estrutura rodoviária do Brasil podem alcançar bilhões de reais por ano, todavia, estes investimentos ainda não suprem todas as necessidades do nosso país. Com isto, os bens produzidos perdem competitividade devido a uma matriz modal deficiente e crítica, no qual as estradas (principal meio de escoamento da produção nacional) encontram-se em estado tal que não são capazes de atender à demanda de transporte de carga do país (Bernucci *et al*; 2006).

Em conformidade com as palavras de Frischtak (2009), de modo recente, o país investiu cerca de 2 % do produto interno bruto (PIB) em infraestrutura, o que é ainda insuficiente em comparação às economias emergentes e às desenvolvidas. A origem fundamental desta problemática é a falta de planejamento, de financiamento e de investimento conjugados com a fragilidade e a incerteza do ambiente regulatório. Entre os anos 2001 e 2007 foi investido, aproximadamente, 0,34 % do PIB em infraestrutura rodoviária, sendo este um valor alto, já que o PIB do ano 2010 foi de US\$ 2,194 trilhões, caracterizando o Brasil como a sétima maior economia do mundo.

No Brasil, segundo a ABDER (2013), a malha rodoviária apresenta-se em péssima situação, tanto em qualidade quanto em quantidade. De acordo com a CNT (2012), o Brasil tem apenas 13 % de sua malha pavimentada. Dos 13 % pavimentados, 54,6 % estão desgastados e 18,1 % estão com trincas e afundamentos.

Conforme publicação técnica do Banco Mundial (2007), entre os anos 2001 e 2007 o gasto médio anual do Brasil foi de aproximadamente R\$ 600 milhões para a reabilitação da malha rodoviária federal pavimentada e de R\$150 milhões para sua manutenção e conservação. No entanto, para aumentar a quantidade de estradas em boas condições de rodagens o Banco

Mundial estima que será preciso investir pelo menos cerca de R\$ 1,200 bilhão por ano entre os anos de 2007 e 2013.

Uma estrada degradada com fendas reduz a velocidade, em média, de 8,7 km/h e uma com o revestimento totalmente destruído a reduz em 31,7 km/h. Além disso, as condições do pavimento afetam o custo funcional dos veículos, sendo o acréscimo médio de 24,80 %; portanto, uma rodovia em bom estado de conservação pode resultar em até 5 % de economia no consumo de combustível, menores tempos de viagem, custos de manutenção e emissões de CO₂ para os veículos que nela circulam. Ademais, o custo anual dos acidentes de trânsito nas rodovias brasileiras alcançou a cifra de R\$ 22 bilhões em 2005, o que equivale a 1,20 % do PIB brasileiro no mesmo período. Muitos destes imprevistos estiveram diretamente relacionados com o estado do revestimento (IPEA, 2006).

De acordo com o IPEA (2014), o setor rodoviário brasileiro é de maneira especial importante pela grande participação que detém no transporte de cargas. Ao longo das décadas de 1990 e 2000, o modal rodoviário respondeu por mais de 60,0 % do total transportado em nosso país. A dependência excessiva do transporte de carga em relação às rodovias fica evidente quando é comparada a participação deste meio de transporte em outros países de dimensões continentais similares às do Brasil. Nos Estados Unidos, a participação das rodovias no transporte de carga é de 26,0 %, na Austrália é de 24,0 % e na China é de apenas 8,0 %.

Segundo publicação IPEA (2016), recentemente, 61,0% das cargas transportadas nacionalmente são deslocadas por meio das rodovias. O Brasil possui mais de 61 mil quilômetros de vias federais pavimentadas, sendo o país com a terceira malha rodoviária mais extensa do mundo, e que apresenta apenas 13,50 % das vias pavimentadas. Apesar de sua extensa malha, o Brasil não possui uma tradição de manutenção e conservação de suas estradas, cuja construção é realizada muitas vezes com a utilização de materiais pouco duradouros e restauradas de forma inadequada.

No país, existem hoje 1.581.104 quilômetros de rodovias, dos quais apenas 213.911 km são pavimentadas, o que representa 13,50 % da malha. Um estudo realizado em 2011 pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) proporciona os seguintes resultados acerca da condição dos pavimentos no Brasil: ótimo - 46,60 %, bom - 5,50 %, Regular - 33,90 %, Ruim - 11,20 %, Péssimo - 2,80 %. Analisando esses dados, pode-se inferir que cerca de 47,90 % das rodovias do país precisam de intervenções urgentes com a finalidade de recuperar suas condições iniciais para desempenhar adequadamente as funções para as quais foram projetadas.

Em relação à estimativa feita nas rodovias do DF, que totalizou 407 km, obteve-se os seguintes resultados: Ótimo – 17,40 %, Bom – 31,0 %, Regular - 44,20 % e Ruim – 7,4 %. Segundo a CNT (2011), no Distrito Federal o custo de restauração, incluindo o tratamento de trincas, ondulações e afundamentos apresenta um valor de R\$ 629.000,00/km.

A manutenção do pavimento é indispensável devido ao desgaste ocasionado pelo seu intenso uso, pelas intempéries e pelo esforço sobre sua estrutura, o que faz decrescer o seu emprego. Assim, uma recuperação ou restauração mal executada ocasiona na melhora pouco efetiva do conforto ao rolamento ou da sua capacidade de suportar tensões sobre ele exercido. Os veículos mais pesados, ao trafegarem sobre as anormalidades do pavimento, têm sua carga estática acrescida, devido a efeitos dinâmicos que atuam por um curto período de tempo nas proximidades da irregularidade, aumentando ainda mais sua magnitude.

Como parte das soluções para a conservação rodoviária, apresentam-se nesta pesquisa uma proposta para o reforço de pavimento asfáltico por meio do uso de geogrelha de fibras de juta. A proposta é usar revestimento asfáltico com adição de fibra de juta para evitar a reflexão de trincas entre um revestimento antigo e uma camada nova, onde ainda pretende-se verificar o possível aporte estrutural gerado pela geogrelha e o incremento na vida útil da camada reforçada. O estudo também visa avaliar o desempenho de adição de fibra de juta no revestimento asfáltico para as estradas não pavimentadas como redução de custos.

2.0 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

A seguinte proposta dissertativa tem como objetivo norteador avaliar o efeito estrutural do uso de fibra de juta como um tipo de reforço em geogrelha no recapeamento de pavimentos asfálticos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a reflexão de trincas sob a ação de ensaios em misturas asfálticas reforçadas por geogrelha feitas de fibras de juta;
- Utilizar equipamento de pequeno porte para ensaio de arrancamento de fibra natural de juta, nos moldes da caixa de testes fabricada por TEIXEIRA (2003); e
- Avaliar outras propriedades mecânicas, sendo estabilidade Marshall, susceptibilidade à umidade e de deformação permanente em misturas asfálticas reforçadas por geogrelha de fibra de juta.

3.0 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação estrutura-se da seguinte maneira:

Capítulo 1: apresenta as considerações iniciais da pesquisa e seus objetivos;

Capítulo 2: feita uma meticulosa revisão bibliográfica sobre os principais pontos inerentes à pesquisa, descrevendo aspetos de interesse na resistência das misturas asfálticas, características importantes da fibra de juta, geossintéticos utilizados em pavimentos e projeto de estruturas de pavimentos, além de destacar os estudos realizados por outros autores;

Capítulo 3: são expostos os materiais e a metodologia seguida nos ensaios que permitiram avaliar o uso da feogrelha natural de fibra de juta em misturas asfálticas;

Capítulo 4: contém os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais que fazem a composição da camada asfáltica;

Capítulo 5: apresenta-se os principais resultados e correlações obtidos; e

Capítulo 6: proporcionam-se as principais conclusões visualizadas de maneira científica entre a pesquisa experimental e bibliográfica e sugestões às pesquisas futuras.

4.0 JUSTIFICATIVA

Com o desempenho da crescente degradação no meio ambiente, o uso de fibras vegetais como matéria-prima vem se consolidando cada vez mais como importante vetor, contribuindo para minimizar o impacto ambiental e, além disso, vem aumentando o interesse nas pesquisas científicas direcionadas para indústria da construção civil e têxtil, entre outras.

Pesquisar sobre o tecido de fibra vegetal de juta aplicado no reforço de matriz asfáltica é significativo na verificação de sua viabilidade técnica, no desenvolvimento de uma rede desta fibra, que resulte em uma geogrelha natural que possa ser empregada na pavimentação asfáltica, favorecendo diretamente no desenvolvimento sustentável da construção civil.

Existe um crescente interesse em pesquisas que possibilitem aumentar a aplicabilidade de fibras de juta na indústria, onde hoje ela já é empregada na produção de tecidos e sacarias, desta forma, as fibras vegetais têm se tornado um forte aliado ecológico para a indústria da construção civil.

O desenvolvimento deste projeto justifica-se em razão da produção de uma geogrelha de fibra de juta para reforço em camada asfáltica visando o aumento de sua resistência e durabilidade.

5.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico apresenta-se a revisão bibliográfica sobre o assunto da pesquisa em questão, esboçando um breve comentário sobre pavimentação asfáltica bem como sobre as geogrelhas em pavimentação.

5.1 GEOGRELHAS EM PAVIMENTAÇÃO

5.1.1 Generalidades

Vultuosas falhas nas rodovias devido a deficiências estruturais podem acontecer precocemente ou ao longo do tempo por pretexto dos efeitos combinados de tráfego dos veículos, características do pavimento e fatores ambientais. O surgimento de deformações permanentes na base e no subleito devido a cargas periódicas, pode, eventualmente, resultar em deformações excessivas ou trincamento total da superfície. O dano por fadiga pode dar-se gradualmente ao longo da vida da estrutura e, desta maneira, excepcionalmente, o pavimento pode tornar-se inoperável antes do final da sua vida útil. Neste caso, o reforço de pavimentos usando geogrelha feita por fibra de juta pode aumentar a resistência do pavimento e reduzir o fenômeno de reflexão de trincas.

Segundo a norma NBR ISO 10318:2013, o termo geossintético é uma denominação genérica de produtos (sintéticos ou naturais), industrializados, desenvolvidos para utilização em obras geotécnicas, desempenhando uma ou mais funções, entre as quais se destacam: reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial.

Conforme a Asphalt Academy (2008), as geogrelhas a serem utilizadas em revestimentos asfálticos buscam evitar a reflexão de trincas entre uma camada nova e uma camada antiga, evitar a saída de finos (fenômeno de bombeamento) ou entrada de água, e outros fatores que possam diminuir as condições de resistência da estrutura. Além disso, estes materiais visam aumentar a vida útil da camada asfáltica em relação à fadiga.

Na engenharia rodoviária são empregados dois tipos de geossintéticos para delongar a reflexão de trincas, os geotêxteis e as geogrelhas. No grupo dos geotêxteis existem os do tipo tecido e os do tipo não tecido, que contemporizam entre si pelo processo de fabricação. O primeiro tem as fibras alinhadas e no segundo as fibras são dispostas aleatoriamente, solidarizadas por processos físicos ou químicos. A geogrelha é deliberada como um produto com estrutura em forma de grelha, com função predominante de reforço, cujas aberturas permitem a interação com o meio em que estão confinadas.

5.1.2 Mecanismos de Atuação das Geogrelhas

Segundo Monismith *et al.* (1980), o mecanismo associado ao emprego de geogrelha é que a mesma atuará como uma interface entre os revestimentos novo e antigo. Nessa interface ocorrerá também a máxima concentração de energia de deformação plástica o que resultará na máxima concentração de tensões. A geogrelha possui rigidez superior à da mistura asfáltica, e impõe que as trincas provenientes da camada inferior sejam redirecionadas para um plano

horizontal. Se a concentração de esforços superar a resistência do reforço ou as tensões advindas da interação revestimento-reforço, o geossintético perderá sua funcionalidade e as trincas começam a se refletir.

Um fator eficaz no uso de geogrelha na reflexão de trincas é que deve existir uma completa aderência entre a camada de reforço (geogrelha) e a estrutura antiga, para que o movimento das trincas seja difundido horizontalmente dentro da camada intermediária criando trincas horizontais que se dissipam e não se refletem para a camada de cima do pavimento.

Em revestimentos capilares (espessuras menores de 5cm) a fibra inferior da camada de reforço se encontra bastante tracionada. O mecanismo de reflexão das trincas se dará principalmente pela fadiga na zona tracionada da camada e será mais influenciada pelas cargas de tráfego e menos pelos ciclos térmicos (Pereira, 2002).

Em revestimentos maiores que 5cm de espessura, a reflexão das trincas, além de ser o mecanismo predominante do processo de dano do pavimento, ocorrerá tanto devido às cargas de tráfego como devido aos ciclos térmicos. Ao incorporar a geogrelha nestas estruturas os seguintes efeitos são esperados:

- Absorção de tensões de origem térmica;
- Absorção de deformações das cargas de tráfego;
- Desvio de trincas de reflexão e, conseqüentemente, atraso na sua reflexão para a capa sobrejacente;
- Redução da severidade das trincas refletidas; e
- Impermeabilização.

Os principais geossintéticos empregados no recapeamento de pavimentos flexíveis são detalhados no próximo tópico:

5.1.3 Geotêxtil

Geotêxteis são definidos como geossintéticos permeáveis fabricados em forma de manta. Entre os diferentes produtos geossintéticos, geotêxteis são os de maior número de possibilidades de uso e podem ser empregados em variadas aplicações na engenharia geotécnica, particularmente, na construção de rodovias.

Os polímeros com maior uso na fabricação de geotêxteis são: polipropileno (± 85 % dos produtos), poliéster (± 12 %), polietileno (± 2 %) e poliamida (± 1 %). Geotêxteis tecidos são fabricados usando métodos tradicionais com uma ampla variedade de tipos. Geotêxteis não

tecidos são fabricados por meio do lançamento de filamentos ou fibras em um rolo giratório, os quais, subsequentemente, têm seus filamentos ligados por processos mecânicos, térmicos ou químicos, (Shukla, 2002).

Segundo Rodrigues (2003), podem-se utilizar três ou quatro vezes mais ligante asfáltico quando utiliza-se um geotêxtil impregnado com asfalto na restauração de um pavimento. Isto acontece devido à alta capacidade de absorção do material, por meio da impregnação dos seus vazios. Devido a este fato obtêm-se os seguintes benefícios:

- Diminuição da permeabilidade, evitando a infiltração da água do topo do pavimento para camadas inferiores, uma vez que os poros da manta são praticamente preenchidos com ligante;
- Quando a aplicação do ligante é homogênea, obtém-se uma aderência mais regular entre a camada de recapeamento e o revestimento subjacente, levando a um melhor desempenho global da camada de recapeamento;
- Redução da velocidade de propagação das trincas refletivas, devido ao seu redirecionamento;
- Redução da severidade das trincas, devido ao bloqueio do bombeamento de finos, pelo efeito de barreira ao fluxo;
- O aspecto prático mais importante na utilização de geotêxteis na reflexão de trincas é a taxa de emulsão asfáltica a ser utilizada, que tem que garantir a melhor aderência entre a camada antiga, o geotêxtil e o recapeamento. Quando se tem pouca emulsão, a tendência é de ter baixa aderência entre as camadas.

5.1.3.1 Geogrelha

As geogrelhas compõem a categoria dos geossintéticos que são projetados especialmente para cumprir uma função de reforço. Este material tem encontrado numerosas aplicações em projetos rodoviários. As aberturas da geogrelha permitem uma melhor interação com o material na qual está enterrada.

As geogrelhas são frequentemente produzidas de polipropileno, polietileno, poliéster e PVA. As geogrelhas de poliéster têm geralmente pouca espessura, o que as torna flexível, e sua ligação é caracteristicamente tecida ou ligada por fusão (Shukla, 2002). Os filamentos de geogrelhas de poliéster são na maioria das vezes revestidos com capa de PVC ou de acrílico,

visando a sua proteção contra danos mecânicos e degradação. As grelhas feitas com polipropileno e polietileno tendem a ser mais rígidas à flexão. Geogrelhas são classificadas dependendo da resistência que podem fornecer nas duas direções, sendo classificadas como unidirecional ou bidirecional. Geogrelhas unidirecionais são geralmente apropriadas para muros e taludes, e bidirecionais são sugeridas para reforço da camada de base de estruturas de pavimentos, por exemplo (Gupta, 2009).

Segundo as palavras de Wickert (2003), a geogrelha tem um módulo de elasticidade à tração alta, comparada com o do geotêxtil impregnado com asfalto e com o próprio concreto asfáltico. Tem-se então que as deformações devido às tensões geradas pelas cargas do pneu, podem ser absorvidas pela geogrelha usada como reforço. É importante destacar que as propriedades típicas das geogrelhas a serem consideradas em um projeto são a rigidez, a temperatura de amolecimento, a abertura entre os elementos e a flexibilidade.

5.1.3.2 Geogrelha de fibra de juta

A utilização da fibra de juta como reforço de pavimentos flexíveis tem como objetivo dotar o pavimento de um reforço capaz de aumentar a sua vida útil, o que, conseqüentemente, repercutirá no consumo de recursos naturais e diminuição de custos de manutenção e restauração do pavimento asfáltico.

Um dos maiores problemas dos revestimentos reforçados com geogrelhas de fibras de juta são a aderência e as juntas de construção da mesma. Quando é colocada uma geogrelha de fibra de juta utilizada como reforço entre uma camada nova e uma antiga, com o propósito de diminuir a reflexão de trincas, é respeitável ponderar a aderência que existe entre esses materiais. No caso de não se ter uma boa aderência do material com a geogrelha, pode-se ter um deslocamento da mistura asfáltica, especialmente em zonas de declive ou de frenagem dos veículos, o que reduz, consideravelmente, a capacidade funcional do calçamento. Outro problema decorrente do uso das geogrelhas de fibras de juta pode ocorrer nas juntas, em decorrência do aparecimento de trincas longitudinais ou transversais. De acordo com Bulher (2007), para evitar danos precoces na instalação do reforço é importante ter em conta as seguintes recomendações:

- As deficiências remanescentes na superfície antiga, devem ser corrigidas;
- A superfície deve estar nivelada evitando a compactação inadequada do reforço, o que ocasiona o surgimento prematuro de trincas e irregularidades longitudinais;

- O reforço deve ser corretamente instalado, caso contrário, pode haver surgimento prematuro de defeitos devido à movimentação da grelha no interior da camada asfáltica;
- Durante a instalação do reforço deve-se garantir que a grelha esteja desenrolada adequadamente, isenta de dobras e rugas, sendo necessária uma correta sobreposição das grelhas quando requerida, assegurando a ancoragem especificada pelo fabricante.

Um dos maiores desafios que apresenta a utilização de sistemas de reforço em revestimentos asfálticos com geogrelhas de fibras de juta é a viabilidade técnica e financeira da reciclagem destas camadas. Buhler (2007) realizou uma avaliação sobre a possibilidade de reciclagem de um pavimento reforçado com grelhas de fibras metálicas. Algumas seções-teste foram executadas com diferentes materiais, no intuito de estimar-se o potencial de reciclagem destes produtos. Nos ensaios, o reforço metálico foi envolvido em lama asfáltica (usado como camada de ligação) com uma espessura de 6 cm. Deste teste, algumas observações puderam ser feitas, quais sejam:

- Devido à alta resistência do aço, não é recomendado cortar a grelha, sob o risco de prejudicar o equipamento de fresagem e reduzir a eficiência do processo;
- Deve-se nivelar a superfície 1 cm acima da grelha, sem atingí-la; e
- Não há qualquer problema em arrancar a grelha metálica usando um guindaste.

Os resultados e conclusões deste estudo comprovam a eficiência de executar uma camada de lama asfáltica sobre o reforço metálico, principalmente no caso de uma futura intervenção que contemple a reciclagem ou mesmo a fresagem.

5.1.4 Geocompostos em pavimentação

O termo geocomposto é aplicado a produtos constituídos por dois ou mais geossintéticos (geotêxteis, geogrelhas, geomembranas, entre outros) que, combinados, desenvolvem uma função específica de forma mais efetiva ou impossível de ser realizada quando são usados separadamente (Shukla, 2002). Os geocompostos utilizados em pavimentação consistem em um tecido (geotêxtil) impregnado com asfalto associado a uma geogrelha. A função do geotêxtil é garantir o melhor grau de aderência entre o geocomposto e o revestimento novo, enquanto a geogrelha confere alta resistência e rigidez.

Os geocompostos geralmente são fabricados usando polipropileno e poliéster. O polipropileno tem uma temperatura de fusão de 165 °C, temperatura que dificilmente será

atingida por uma mistura asfáltica. Por esta razão este material é um dos mais populares na fabricação de geocompostos para capas asfálticas.

Segundo Button & Lytton (2003), o uso de geocompostos em pavimentação apresenta as seguintes vantagens e desvantagens:

Vantagens:

- Os geocompostos impregnados com asfalto evitam, ou minimizam, a infiltração da água da superfície para o interior da estrutura do pavimento;
- O geocomposto pode permanecer sem ser comprometido depois do trincamento da superfície ocorrer, o que constitui uma barreira para o ingresso da água; e
- O geocomposto reduz o fenômeno de reflexão de trincas.

Desvantagens:

- O geotêxtil tem que estar totalmente impregnado de asfalto para constituir uma barreira contínua contra fluxo;
- A deterioração precoce do recapeamento pode acontecer caso o geocomposto seja disposto em um pavimento antigo e trincado e a mistura nova seja deficientemente compactada;
- O uso de geocompostos tem se apresentado ineficiente na redução de reflexão de trincas por efeitos térmicos. Em locais com alta precipitação e regiões com ciclos de congelamento e descongelamento, onde têm sido executados recapeamentos com geocompostos, tem-se observado pouca efetividade na redução de reflexão de trincas;
- O uso de geocompostos apresenta pouca efetividade quando a abertura das trincas é maior que 9,5 mm.

Deve-se advertir no entanto, que as desvantagens apresentadas por Button *et al.* (2003) estão mais relacionadas com o processo construtivo do recapeamento do que propriamente com o uso do geocomposto.

5.1.5 Emprego de geogrelha de fibras de juta em reflexão de trincas

As geogrelha de fibras de juta podem atuar de duas maneiras em um revestimento asfáltico: desviando as trincas ou convertendo as trincas em microfissuras ao se propagarem. Quando são usados geotêxteis impregnados com asfalto na interface precisa-se de uma taxa maior de ligante asfáltico do que a obtida com uma pintura de ligação convencional.

O desempenho integral do pavimento é, portanto, melhorado por meio de uma combinação de efeitos: atraso do trincamento por reflexão, trincas refletidas de severidade

atenuada e manutenção da estanqueidade do revestimento, protegendo as camadas subjacentes da ação das águas pluviais e, dessa forma, mantendo a resistência da estrutura às deformações plásticas sob cargas repetidas e evitando o bombeamento de finos da camada de base através das trincas refletidas (Montestruque, 2002).

No caso da utilização das geogrelhas, a reflexão é visualizada pela formação de microfissuras de baixa severidade, apresentando trajetórias aleatórias, com progressão lenta. O primeiro material usado para a confecção de geogrelhas foi o poliéster e em seguida a fibra de vidro. A geogrelha de estrutura aberta tem módulo de elasticidade alto, comparado com o geotêxtil impregnado com o ligante e com o próprio concreto asfáltico.

Austin *et al.* (1996) estudaram, em um ensaio a escala real, o uso de um geocomposto (grelha e geotêxtil) como tratamento para o fenômeno de reflexão de trincas. Neste ensaio foram avaliadas três tipos de estruturas; a primeira, de controle, que não tinha reforço; a segunda com o reforço localizado no meio da camada asfáltica e a terceira estrutura com o reforço na base da camada asfáltica. O carregamento foi aplicado mediante um pneu carregado com 6 kN e uma pressão de contato de 300 kPa. Os resultados destes ensaios mostraram que as seções do pavimento testadas com o reforço resistiram três vezes mais que a seção de controle.

Komatsu *et al.* (1998) avaliaram geogrelhas de alto módulo e alta resistência no reforço de misturas asfálticas, visando reduzir as deformações plásticas decorrentes do efeito combinado do clima e da passagem de veículos. Os ensaios foram realizados para corpos de prova com e sem reforço, por meio do uso de um simulador de tráfego. Os resultados obtidos mostraram que a presença das geogrelhas aumentaram a resistência ao afundamento em comparação com os corpos de prova sem reforço. Foram também verificados que as geogrelhas com menor abertura apresentavam maior resistência devido a maior aderência entre a mistura e a geogrelha.

Montestruque (2002) avaliou o comportamento de dois tipos de geossintéticos, uma geogrelha e um geotêxtil não tecido, realizando ensaios de fadiga em vigas de concreto asfáltico com as seguintes dimensões: $L= 46$ cm, $B= 7,5$ cm, $H= 7,5$ cm, onde L era o comprimento da viga, B a largura e H a altura. Durante os ensaios foram variadas as seguintes condições: posição da carga, pressão, posição da geogrelha, dimensões da pré-trinca. Os resultados obtidos mostraram que a inclusão do geossintético como alternativa de restauração de pavimentos trincados mostrou-se eficaz para retardar ou para até mesmo interromper a propagação de trincas de reflexão. Além disso, observou-se o efeito de redirecionamento da trinca, devido à

maior rigidez da geogrelha. A resistência à fadiga também aumentou em comparação com os resultados obtidos com o geotêxtil.

Wickert (2003) realizou um conjunto de ensaios com diversos tipos de geotêxteis, analisando o efeito de temperatura, incluindo ensaios de tração de faixa larga sem impregnação e com impregnação e ensaios de permeabilidade com diversas taxas de ligante. Nestes ensaios, o autor procurou obter parâmetros que contribuiriam na melhora de procedimentos de instalação e de escolha do material, que afetam diretamente o desempenho dos pavimentos. Como resultados, foi encontrado que a principal causa dos defeitos está relacionada à instalação e à impregnação insuficiente do geotêxtil.

Fritzen (2005) avaliou diferentes soluções de reforço em um trecho experimental na rodovia Rio-Teresópolis (RJ). No total foram construídos quatro trechos experimentais que foram testados por meio de ensaios acelerados com o simulador de tráfego móvel HVS. Conclui-se que, das soluções empregadas, aquela que apresentou melhor comportamento foi a que utilizou uma geogrelha.

Bulher (2007) analisou o processo de instalação de geogrelhas como reforço, o efeito de sua inserção nas camadas asfálticas de recapeamento e os procedimentos para o dimensionamento estrutural. Na pesquisa foram realizados ensaios de fadiga em vigas prismáticas de concreto asfáltico. Os resultados obtidos revelam que as geogrelhas poliméricas proporcionam o melhor resultado na reflexão de trincas.

Zou *et al.* (2007) realizaram um trecho experimental de pavimento reforçado com diferentes tipos de geogrelhas na província de Shanxi, China. Os reforços utilizados foram três geogrelhas de fibra de vidro, uma geogrelha plástica, dois geotêxteis e um geocomposto. Os geossintéticos foram instalados na interface entre um revestimento asfáltico novo e uma base estabilizada com cimento nova. Como resultados obtidos de avaliações funcionais e estruturais encontrou-se que as deflexões nas estradas com uso de reforço foram menores em comparação com as estradas sem reforço. Observações feitas quatro anos depois da rodovia estar em serviço mostraram que os geossintéticos não desempenham suas funções, se a capacidade de carga da base ou sub-base são insuficientes, se o revestimento asfáltico é fino demais ou se não são realizadas restaurações sobre o revestimento deteriorado.

Khodaii *et al.* (2009) estudaram o efeito do uso de reforço com geossintéticos na redução do fenômeno de reflexão de trincas. Durante os ensaios foi variada a localização do geossintético, tipo de pavimento, temperatura e intensidade da trinca. As dimensões dos corpos de prova foram: 380 mm x 150 mm x 75 mm e as condições de apoio do corpo de prova foram

dos seguintes tipos: uma base de mistura asfáltica, uma base de concreto e uma placa de neopreno com módulo de elasticidade igual a 11 MPa. O carregamento foi aplicado por meio de uma placa circular de aço com 112 mm de diâmetro com uma frequência de ensaio de 10 Hz. A máxima carga aplicada foi de 6,79 kN, resultando em uma pressão de contato de 690 kPa e os corpos de prova foram avaliadas sob as temperaturas de 20 °C e 60 °C. Dos resultados obtidos estabeleceu-se que a utilização de geogrelhas melhorou o desempenho do recapeamento, além de verificar-se que o fenômeno de reflexão de trincas é função da posição da geogrelha, temperatura e da rigidez relativa entre o recapeamento e o pavimento antigo.

Virgili *et al.* (2009) relataram resultados de estudos realizados acerca do reforço de camadas duplas de mistura asfáltica com o uso de geogrelhas. Nos estudos foram avaliados vários tipos de sistemas duplos e um sem reforço como ensaio de controle. Os materiais de reforço empregados foram: uma geogrelha de fibra de vidro, uma geogrelha de poliéster e uma geomembrana. O estudo foi realizado em corpos de prova de vigas prismáticas, aplicando carregamento cíclico com uma frequência de 1 Hz. As condições de apoio foram as mesmas de uma viga apoiada em quatro pontos (*four point bending* - 4PB). O critério de finalização do ensaio foi estabelecido como o número de ciclos necessários para que a amostra chegasse a uma deformação permanente estabelecida. Além disso, foi criado um modelo matemático com o objetivo de efetuar comparações entre valores previstos e os valores experimentais. Dos resultados obtidos, foi concluído que o ensaio de viga apoiada em quatro pontos é capaz de mostrar diferenças de rigidez entre vigas com e sem reforço. O modelo matemático simulou adequadamente o comportamento de vigas reforçadas e sem reforço submetidas a carregamento cíclico.

Hosseini *et al.* (2009) ponderaram o uso de geossintéticos no reforço de pavimentos asfálticos no aeroporto Khomeini, em Tehran, Iran. Foram avaliados corpos de prova reforçados e sem reforço, com dimensões 50 mm x 64 mm x 381 mm, obtidos diretamente da pista de pouso do aeroporto. A avaliação foi realizada conforme a norma ASTM D7460 e o carregamento foi aplicado com uma frequência de 10 Hz. Dos resultados obtidos foi concluído que os corpos de prova reforçados com geossintéticos apresentaram um alto módulo de rigidez e uma baixa propagação de trincas, em comparação com corpos de prova não reforçados.

Bastos (2010) pesquisou o comportamento mecânico de misturas asfálticas reforçadas com geogrelhas, realizando, basicamente, um modelo físico de grande escala. Os resultados obtidos mostraram que a presença de geogrelha como reforço melhorou o comportamento mecânico das misturas asfálticas com a tendência de maior resistência à fratura.

Ferrotti *et al.* (2011) ponderaram sobre reforço de misturas asfálticas com geogrelhas de fibra de vidro cobertas com resinas epóxi, bidirecional e com abertura de 33 mm x 33 mm. Os ensaios realizados visaram à obtenção de parâmetros da resistência de interface, avaliando diferentes tipos de emulsão asfáltica e diversas tensões de confinamento (0 MPa, 0,2 MPa e 0,4 MPa). Além disso, foi avaliado o aporte estrutural por meio da realização de ensaios de fadiga em vigas apoiadas em quatro pontos (4PB). Os parâmetros adotados pelos autores para a realização do ensaio foram carregamento cíclico de 1 kN com frequência de 1 Hz, temperatura de 20 °C e um tempo de ensaio de oito horas. Dos resultados obtidos durante os ensaios pode-se concluir que a geogrelha apresentou uma baixa aderência com as camadas asfálticas, mas este problema pode ser resolvido com a utilização de emulsões asfálticas modificadas com polímeros que melhoram a aderência entre os materiais. Com relação ao aporte estrutural da fibra de vidro, foi apresentada uma melhoria de até duas vezes em relação à viga sem reforço.

Correia *et al.* (2011) avaliaram diferentes tipos de geotêxteis não tecidos de polipropileno e de poliéster, impregnados com uma emulsão catiônica de ruptura rápida. A avaliação das mudanças do comportamento de amostras embebidas com asfalto e sem asfalto foram realizadas por meio de ensaios de tração de faixa larga e ensaios de permeabilidade. Os resultados obtidos apresentaram um importante acréscimo na resistência à tração, além de demonstrar que a emulsão asfáltica catiônica aplicada a geotêxteis não tecidos permitiu uma drástica redução da permeabilidade devido às características impermeabilizantes do ligante asfáltico.

Barraza *et al.* (2011) estudaram a durabilidade de um sistema antireflexão de trincas, composto por uma camada antiga, reforço geossintético e a camada nova. Para o propósito da pesquisa foi desenvolvido um equipamento que permitisse a aplicação de carregamento cíclico, simulando o carregamento imposto pelos veículos. No total, foram avaliadas seis geogrelhas, com distintas características, incluindo uma geogrelha de poliéster recoberta com polímero, geogrelha de fibra de vidro, além de geotêxteis não tecidos e de um geocomposto coberto com emulsão asfáltica. O carregamento foi aplicado sob uma frequência de 10 Hz, temperatura de 20 °C e carregamento variando entre 3 kN e 19 kN. O critério de finalização dos ensaios foi a reflexão da trinca imposta na camada inferior até a superfície da amostra. Dos resultados obtidos concluiu-se que os geossintéticos empregados aumentam o tempo para que as trincas sejam refletidas da camada inferior para a superior, além de mostrar que as geogrelhas com maior rigidez levam a um melhor desempenho do conjunto.

5.2 RUPTURA DE PAVIMENTO ASFÁLTICO

5.2.1 Fadiga em mistura asfáltica

O fenômeno da fadiga relaciona-se ao episódio de que muitos materiais, sendo sucessivamente solicitados em níveis de tensão inferiores àqueles de ruptura, aos poucos desenvolvem alterações em sua estrutura interna, que resultam na perda de características estruturais originais. Isso gera um processo de microfissuração progressiva que culmina no desenvolvimento de fraturas e, conseqüentemente, no rompimento do material (Balbo, 2007).

Segundo a ASTM D 7460-10, a fadiga é definida como o processo de mudança estrutural permanente, progressiva e localizada, que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis e que produzem as fissuras que conduzem à ruptura, após um determinado número de ciclos. Assim, pequenas cargas isoladas não são suficientes para levar os materiais asfálticos até a ruptura. O fenômeno de fadiga é devido ao acúmulo de ações mecânicas e/ou térmicas aplicadas de forma cíclica, o que vai gerando zonas de plastificação do material que acabam definindo planos de fraturas e descontinuidades, comprometendo bastante as respostas estruturais iniciais.

A vida de fadiga em pavimentos asfálticos pode ser deliberada com a intensidade de tráfego, representado pelo número de eixos padrões, que a estrutura pode suportar antes da ruptura. O grau de tolerância a danos por fadiga pode variar, dependendo das cargas de tráfego de projeto (Baburamani, 1999).

As variáveis que influenciam o comportamento de uma estrutura de pavimento podem ser categorizadas como: variáveis de carga, inconstantes ambientais, alteração de construção e características do material. Todas essas alterações precisam ser levadas em consideração para a previsão do comportamento no campo. Em certa medida, variáveis de construção e características do material podem ser controladas, enquanto carregamento (cargas por eixo, distribuição, carga intermitente, pressão de calibragem do pneu, etc.) e fatores ambientais (temperatura, umidade, etc.) podem alterar significativamente. As diferenças entre laboratório e campo, particularmente, com respeito às cargas e fatores ambientais, induzem à necessidade do emprego de um fator de correção para se prever a vida de fadiga com base em previsões feitas a partir de ensaios de laboratório. Alguns dos fatores que contribuem no comportamento do pavimento, mas, não podem ser totalmente reproduzidos no laboratório e que precisam de um fator de correção são: temperatura, períodos de descanso entre duas cargas consecutivas,

envelhecimento, deformação de tração, carga por eixo e direção do tráfego (Baburamani, 1999).

Podem-se considerar quatro causas principais dos processos de fadiga, conforme se discorre adiante:

- Vazios iniciais elevados em misturas podem gerar um envelhecimento prematuro do asfalto, devido ao dano gerado pela ação combinada do tráfego e/ou clima. Isso vai gerando um aumento da rigidez do material por perda de moléculas mais voláteis, que facilita o posterior trincamento por fadiga. Os altos teores de vazios iniciais podem ocorrer por vários motivos, entre eles compactação deficiente, projeto errado da mistura e baixo teor de asfalto;
- Presença de fissuras iniciais nos materiais pode acontecer pela compactação da mistura com viscosidade reduzida por causa da diminuição da temperatura. Fissuras também podem surgir em decorrência do uso de mistura envelhecida, que se torna rígida e quebradiça, de difícil compactação;
- Deformação plástica excessiva, prematura ou em longo prazo, devido às características reológicas do ligante asfáltico, sendo importante a escolha do ligante em função das características climáticas onde vai ser usado. Por exemplo, em zonas onde prevalecem baixas temperaturas ao longo do ano, é preciso um asfalto dúctil. Caso contrário, onde as temperaturas são predominantemente altas, deve-se escolher um ligante mais rígido. No caso de locais com estações climáticas definidas, precisa-se de um asfalto capaz de apresentar um comportamento satisfatório às condições do clima;
- Ocorrências de zonas de concentração de tensões na superfície (como ranhuras e sulcos) constituem fator de deterioração para o comportamento à fadiga dos materiais, quando sujeitos a esforços de tração. Nessas zonas ocorre concentração de tensões que podem provocar as primeiras fissuras, em um processo que tende a progredir (Balbo, 2006).

Segundo Bernucci *et al.* (2006), as fissuras de fadiga se manifestam nas superfícies de revestimentos asfálticos segundo três estágios diferentes, conforme mostra a Figura 1.

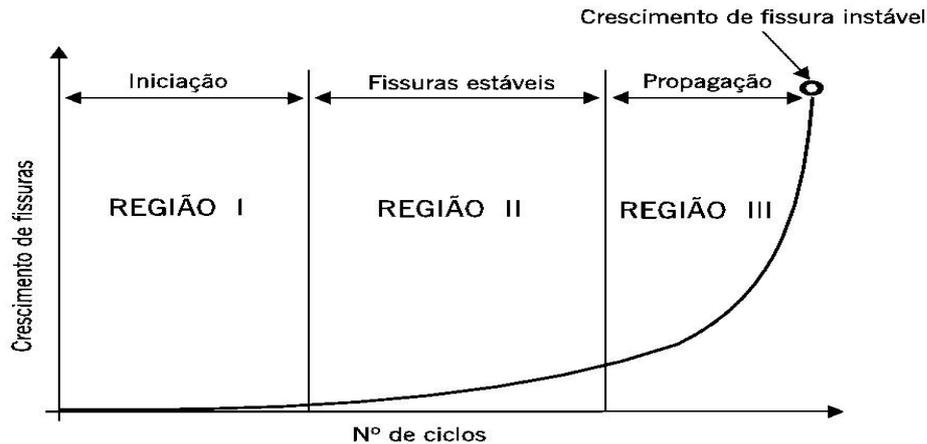


Figura 1- Estágios existentes num processo de fadiga (modificado por Bernucci *et al.* 2006).

- Região I: Ocorrem as primeiras mudanças estruturais, formam-se microfissuras; os deslocamentos crescem e a zona de danos irreversíveis se inicia neste momento;
- Região II: Caracterizada pelas microfissuras originadas do crescimento das microfissuras;
- Região III: Crescimento das microfissuras conduzindo rapidamente ao colapso total.

5.3 TRINCAS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

5.3.1 Generalidades

As deformidades na superfície do pavimento podem surgir a curto, médio e longo prazo. A celeridade de surgimento dos defeitos vai depender de diversos fatores, tais como: erros de projeto, falhas de construção, materiais de baixa qualidade, erros na conservação, manutenção e efeito da deterioração por fadiga.

As falhas de projeto podem surgir devido a fatores tais como ausência de informação climatológica, que permita dar uma estimativa do possível comportamento futuro da estrutura em função das mudanças de temperatura e dificuldades em se prever o tráfego real que atuará no período do projeto, escolha equivocada de materiais e drenagem deficiente, por exemplo.

De acordo com Bernucci *et al.* (2006), entre os erros ou problemas construtivos, destacam-se: espessuras menores que as previstas no projeto, falta de compactação apropriada das camadas e execução da obra sob condições climáticas desfavoráveis.

As inadequações na seleção de alternativas de conservação e manutenção podem causar novos defeitos como, por exemplo: reforço de revestimentos asfálticos com pouca espessura e de rigidez elevada sobre pavimento muito trincado, possibilitando a reflexão de trincas precoce

e restauração com revestimentos permeáveis sobre superfícies muito trincadas, permitindo a entrada de água (Bernucci *et al.*, 2006).

Antes da seleção de qualquer opção de restauração ou reconstrução é imprescindível um bom diagnóstico que permita identificar as principais causas que determinaram a deterioração da estrutura. Assim, necessita-se de um reconhecimento em campo, levantamento de dados climáticos, estudo de tráfego, mapas geológicos, pedológicos e geotécnicos, além de uma avaliação estrutural, de forma a se conhecer o estado real da estrutura em termos de capacidade de suporte.

5.3.2 Classificação das trincas

Conforme a norma DNIT 005/2003-TER (“Defeitos nos pavimentos flexíveis e Semi-rígidos Terminologia”), define-se fenda como qualquer descontinuidade na superfície do pavimento que conduza a aberturas de menor ou maior porte. A fenda pode ser classificada como fissura ou trinca. A fissura é definida como fenda de largura capilar existente no revestimento, posicionada longitudinal, transversal ou obliquamente ao eixo da via, e a trinca é a fenda existente no revestimento, visível a olho nu, com abertura superior à da fissura, podendo apresentar-se sob a forma de trinca isolada ou trinca ligada.

Segundo à tipologia, as fendas se dividem em:

- Trinca transversal curta (TTC) ou longa (TTL); • Trinca longitudinal curta (TLC) ou longa (TLL);
- Trinca isolada de retração (TRR).

As trincas interligadas se dividem em:

- Trincas interligadas tipo “Bloco”, sem erosão acentuada nas bordas (TB) ou com erosão (TBE);
- Trincas interligadas tipo “Couro de jacaré”, sem erosão acentuadas nas bordas (J) ou com erosão (JE).

A classificação das fendas, segundo o tamanho da abertura, é a seguinte:

- FC-1: trincas cujas aberturas são menores que 1,0 mm;
- FC-2: trincas cujas aberturas são superiores a 1,0 mm, sem erosão nas bordas; e
- FC-3: trincas cujas aberturas são superiores a 1,0 mm, com erosão nas bordas.

5.3.3 Reflexão de trincas

O fenômeno de reflexão de trincas aparece devido ao contato pleno entre uma camada nova (superior) e uma camada antiga (inferior), que apresenta fissuras em sua superfície. Na região de contato, onde há a fissura na camada inferior, ocorre um estado diferenciado de tensões. Se a interface do revestimento trabalha à tração na flexão, a fissura no topo da camada inferior tende a se abrir em um ponto que apresentará descontinuidade de distribuição de esforços e, conseqüentemente, ocorre a propagação da trinca até a superfície, aumentando gradualmente a quantidade de trincas, intensidade e severidade de cada uma delas em função da combinação de fatores internos e externos (fadiga, tráfego, clima, entre outros). Outro modo de abertura da fissura é aquele devido às cargas que geram movimentos verticais relativos entre as partes fissuradas da camada subjacente (Balbo, 2006).

5.4 FIBRAS VEGETAIS

5.4.1 Classificação

Segundo Young (1994), as fibras vegetais são agrupadas em cinco tipos, dependendo da parte e do tipo de vegetal do qual foi retirada, e podem ser classificados em:

- Fibras de Gramíneas: Retiradas das hastes de plantas monocotiledôneas, tendo como exemplo os cereais (trigo, aveia, cevada, arroz e outros) além do junco, bambu e bagaço de cana.
- Fibras de folhas: Retiradas ao longo do comprimento das folhas, exemplos típicos incluem a abacá, sisal e henequém.
- Fibras de caule: São de maços retirados do interior da casca (caule) de haste das plantas, tendo como exemplos, linho, juta, cânhamo e kenaf.
- Fibras de sementes e frutos: O exemplo mais comum é o algodão.
- Fibras de madeira: São fibras provenientes do xilema de vegetais (angiospermas e gimnospermas), tendo como exemplos os eucaliptos, abetuos, pinus, entre outros.

5.4.2 Propriedades Mecânicas

As características macroscópicas de maior interesse, no estudo das fibras, são aquelas

interrelacionadas com o comportamento dos compósitos resultantes. A resistência a tração e o módulo de elasticidade são propriedades das fibras que exercem influência direta no desempenho do compósito. Segundo Isaias (2007), a elevada resistência das fibras é função da reduzida seção transversal que reduz a possibilidade de ocorrer efeitos de composição; e o elevado módulo de elasticidade das fibras permite que elas atuem como reforço por apresentarem elevado nível de tensão no momento de ruptura da matriz. Assim, costumam ser de interesse as seguintes propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras vegetais (AGOPYAN, 1991; NEEDLES, 2001):

- Densidade: A densidade refere-se a um certo grau da natureza do empacotamento molecular, cristalinidade, e o alinhamento molecular na fibra.

- Módulo de elasticidade: As fibras vegetais por apresentar módulos baixos, mas associados a compósitos servem devido a sua elevada absorção de energia e resistência a esforços dinâmicos. Na Tabela 1 são apresentados alguns dos valores de propriedades mecânicas das fibras em geral.

Tabela 1: Propriedades mecânicas

Fibra	Densidade (g/cm^3)	Alongamento (%)	Resistencia à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Coco	1,2	30,0	175	4,0 - 6,0
Algodão	1,5 - 1,6	7,0 - 8,0	287 - 597	5,5 - 12,6
Juta	1,3 - 1,5	1,5 - 1,8	393 - 773	26,5
Linho	1,5	2,7 - 3,2	345 - 1035	27,6
Rami	***	3,6 - 3,8	400 - 938	61,4 - 128
Sisal	1,5	2,0 - 2,5	511 - 635	9,4 - 22,0

Fonte: Bledzki e Gassan (1999), Ramesh, Palanikumar e Reddy (2013).

5.4.3 Estrutura

Cada camada das células ou fibras individuais é constituída, basicamente, por microfibrilas de celulose semicristalina, rodeadas por uma matriz de hemicelulose e lignina. As microfibrilas têm diâmetro de cerca de 10-30 nm e são responsáveis por dar a resistência mecânica às fibras. A matriz de hemicelulose é ligada por pontes de hidrogênio com as microfibrilas de celulose formando uma rede tridimensional. Já a lignina forma outra rede que se intercala tridimensionalmente com a rede de hemicelulose e microfibrilas, e ajuda na rigidez da parede da célula (SILVA, 2003; MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2005; VINCENT, 2000).

As células da fibra tem de $10\mu\text{m}$ a $25\mu\text{m}$ de diâmetro e, conforme Coutts (1990), são compostas por quatro camadas de microfibrilas conforme a Figura 2: parede primária, mais externa, de estrutura reticulada, (ii) camada secundária S1, de estrutura também reticulada, (iii) camada secundária S2, em que as microfibrilas estão orientadas segundo o ângulo θ , com relação ao eixo longitudinal da célula, em espiral e (iv) camada S3, mais interna, também com as microfibrilas em forma de espiral. A camada S2 é a de maior espessura e também de maior teor de celulose. Na parte interna da célula, há uma cavidade central de seção elíptica, com dimensão de $5\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$, denominada lúmen.

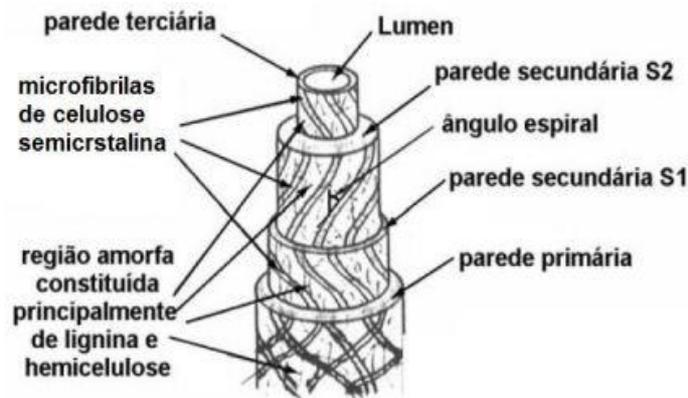


Figura 2 - Estrutura da fibra natural
Fonte: Coutts (1990).

5.4.4 Composição das fibras lignocelulósicas

As fibras naturais podem ser chamadas também de fibras lignocelulósicas e são ricas em lignina, hemicelulose e celulose e outros materiais em pequenas quantidades, como descrito abaixo (BRÍGIDA *et al.*, 2010; DUXSON *et al.*, 2007).

Celulose é o polissacarídeo mais farto da natureza, existindo em maior proporção nas plantas, além de ser o principal componente da parede celular da fibra (ROWELL *et al.*, 2005; MENDES, 1992). A celulose pode ser caracterizada como um polímero de alta massa molar, constituído exclusivamente por β -D-glicose dando origem a um polímero linear (FONSECA, 1998; FENGEL, 1984).

As moléculas de celulose tendem a formar ligações de hidrogênio intramoléculares (entre unidades de glicose da mesma molécula) e intermoléculares (entre unidades de glicose de moléculas adjacentes). O primeiro tipo de interação é responsável pela rigidez das cadeias

unitárias e o segundo pela formação da fibra vegetal (MAGALHÃES, 1980; SJOSTROM, 1993).

A celulose expõe regiões cristalinas e amorfas. Água, materiais gasosos e outros líquidos podem penetrar facilmente nas fibrilas e nas microfibrilas devido aos inúmeros capilares e pequenos orifícios encontrados nas regiões amorfas da parede celular (TÍMÁR-BALÁZSY; EASTOP, 1998).

A celulose sólida é semicristalina, ou seja, sobrepujam na sua maior parte regiões cristalinas intercaladas por regiões amorfas. As microfibrilas das fibras vegetais são formadas por esta celulose, e têm a forma de finos tubos sólidos e cristalinos. Elas são resistentes a soluções alcalinas de até 17,5 % em peso, mas, são facilmente hidrolisadas por ácidos (BLEDZKI; GASSAN, 1999; MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2005).

Hemicelulose é o termo dado aos polissacarídeos das fibras vegetais. São polímeros de glicose, maltose, xilose, galactose e outras hexoses e pentoses. O teor e a magnitude dos diferentes componentes da hemicelulose de madeiras e fibras variam conforme a espécie da árvore. A maior parte das hemiceluloses pode ser retirada por meio de tratamentos com soluções alcalinas e aquosas. A hemicelulose é o componente responsável pela biodegradação, absorção de umidade e degradação térmica da fibra. Ela atua como agente de ligação entre celulose e lignina (BROWNING, 1963; FENGEL, 1984).

A principal diferença entre as hemiceluloses e as celulosas deve-se ao fato de que as hemiceluloses apresentam várias unidades de açúcares diferentes. Assim, o termo hemicelulose não designa um composto químico definido, mas, sim, uma classe de componentes poliméricos presentes em vegetais fibrosos, possuindo cada componente, propriedades peculiares (SANTOS *et al.*, 2001; PHILIPP; D'ALMEIDA, 1988).

Lignina é uma substância polimérica amorfa altamente complexa que confere firmeza e rigidez estrutural aos conjuntos de fibras de celulose, cujo polímero é formado por unidades aromáticas de fenilpropano (CHAND; VERMA; ROHATGI, 1987; FENGEL, 1984). É quase impossível separar a lignina das fibras detendo a alteração ou degradação de sua estrutura. Sendo um constituinte cuja abundância na madeira pode variar de 15 a 30 %, dependendo da espécie, sendo depois da celulose o material orgânico de origem vegetal mais abundante (TITA; PAIVA; FROLLINI, 2002). Embora a lignina seja encontrada em muitas plantas de reino vegetal, sua constituição varia, pois, não é uma substância química definida, mas, sim,

uma classe de compostos correlatos (SJOSTROM, 1993).

Extrativos vegetais são compostos orgânicos (terpenóides, ácidos graxos, flavonóides esteróides e outros compostos aromáticos) que não fazem parte da parede celular lignocelulósica. São substâncias que podem ser extraídas por solventes (BLEDZKI; GASSAN, 1999). Estes constituintes são responsáveis pelas características da planta como: cor, sabor, cheiro e resistência natural a decomposição. O teor de extrativos nas fibras gira em torno de 3 a 10 % (LEWIN; GOLDSTEIN, 1991; ROWELL; HAN; ROWELL, 2000).

A Tabela 2 traz para algumas fibras mais utilizadas, os teores de massa de celulose, lignina e água.

Tabela 2: Composição química de fibras

Fontes de	Celulose	Hemicelulose (%)	Lignina	Água
Casca de	36 - 43	0,15 - 0,25	20 -45	10 - 12
Algodão	82,7	5,7	***	10
Juta	64,4	12,0	11,8	10
Linho	64,1	16,7	2,0	10
Rami	68,6	13,1	0,6	10
Sisal	65,8	12,0	9,9	10

Fonte: Khedari, Watsanasathaporn e Hirunlabh (2005), Bledzki e Gassan (1999), Reddy e Yang (2006), Williams e Wool (2000), Bogoeva-Gaceva *et al.* (2007)

5.4.5 Propriedades Físicas

A geometria das fibras influencia diretamente na adesão dos compósitos e implica diretamente na forma de ruptura dos mesmos, além de afetar de forma significativa a sua ductilidade (JONES, 1994). A utilização de filamentos de comprimento contínuo é a maneira mais eficaz de se promover o empacotamento adequado das fibras empregadas como reforço em compósitos como mostra a figura 10 (PIRES *et al.*, 2009).

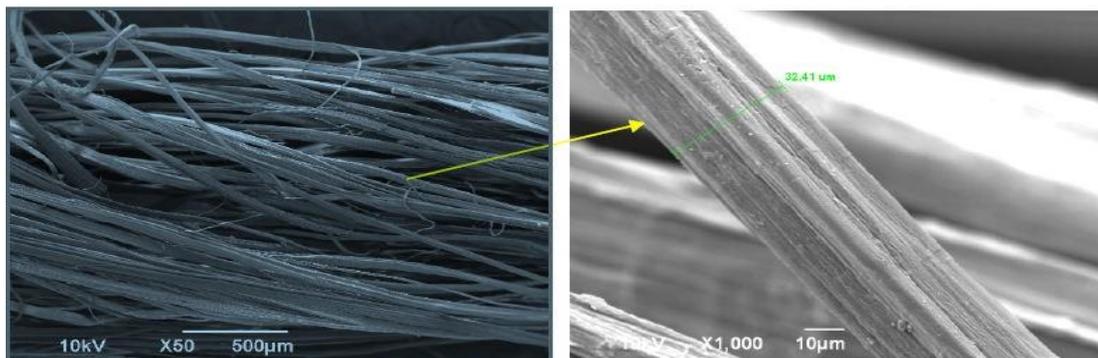


Figura 3 - Micrografias eletrônicas de varredura de: (a) um fio de juta, (b) um monofilamento.
Fonte: Pires et al. (2009)

Segundo Melo Filho (2012), quando uma seção transversal de uma única fibra é observada ao microscópio (MEV), a estrutura da fibrocélula, esquematizada na Figura 04, é vista claramente. Cada fibrocélula tem um diâmetro médio de 10 a 20 μm , com um orifício central chamado lúmen, que é responsável pela incidência de poros permeáveis nas fibras, o que acarreta elevada absorção de água e massa específica, este compreende cerca de 10% da área da seção transversal da fibrocélula.

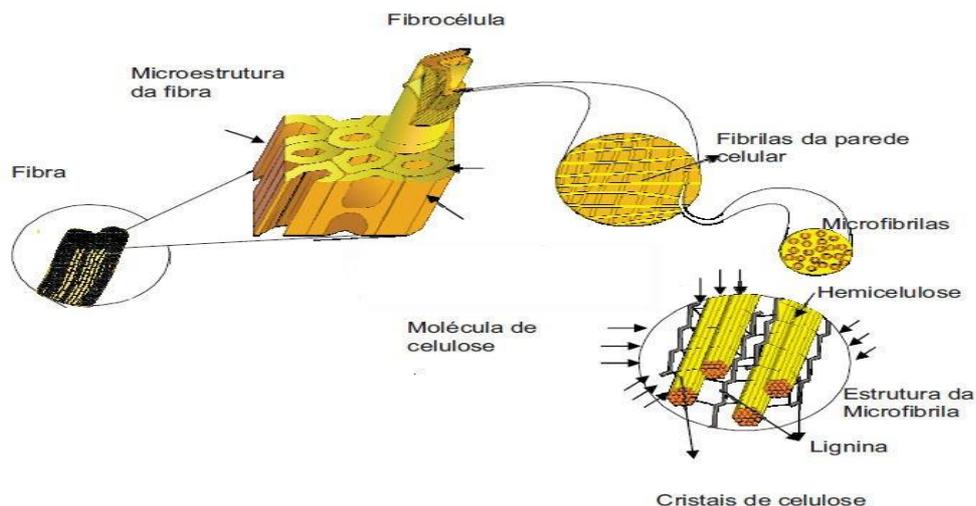


Figura 04 - Representação das fibrocélulas, fibrilas, microfibrilas e cristais de celulose de fibra vegetal
Fonte: Adaptado de Melo Filho (2012)

5.5 FIBRA DE JUTA

A juta é uma planta nativa da família das tiliáceas (*Corchorus capsularis*), originária da Índia e de Bangladesh, diferentes espécies também são desenvolvidas na Tailândia e na China. No Brasil, ela está concentrada em regiões alagadiças da Amazônia, junto às populações ribeirinhas, sendo uma cultura de subsistência cujos requisitos necessários para o cultivo são a abundância de água e altas temperaturas. Proporcionando excelentes propriedades ecológicas, pois é biodegradável e durante seu crescimento controla a erosão, a fibra da juta é utilizada em sacarias, especialmente para armazenamento de produtos agrícolas e bolsas artesanais. No Brasil, são amplamente empregadas para acondicionamento de batata, café e açúcar, principalmente em produtos que serão exportados, sobretudo para países que adotam criterioso controle ambiental (OLIVEIRA, 1997).

O cultivo da juta, já por quase meio século, é extraordinária para a economia da região amazônica, em função de sua capacidade de fixação da população no campo e da utilização

de forma produtiva das áreas de várzea na extensão do Rio Amazonas, mais especificamente nos municípios localizados à margem do rio nos estados do Amazonas e Pará. Isto se deve, em grande parte, à relativa facilidade de exploração regional dessas plantas e ao sucesso da comercialização das fibras no comércio nacional, aliado à extraordinária adaptação da juta na região e à presença da malva, nativa no Estado do Pará e posteriormente cultivada no Estado do Amazonas.

As fibras e a planta de juta, figura 5, chamadas comercialmente de "fibras moles" são empregadas na confecção de telas e tecidos de aniagem, serrapilheiras, cordas, barbantes, tapetes, entre outros. Em relação ao seu emprego na indústria têxtil, as fibras de juta têm uma pequena pigmentação e podem ser tingidas sem alvejamento. Difere também por ter moderada afinidade para tingimentos básicos (Mohanty et al, 2005).

O solo para o plantio deve estar completamente limpo, roçado, sem restos, touceiras, etc. Antes do plantio, deve-se realizar uma capina na área que será utilizada para a cultura. O plantio deve ser feito sempre no início da estação das chuvas, por se tratar de uma cultura que necessita de grandes quantidades de água.

O plantio pode ser totalmente mecanizado, totalmente manual ou, ainda, pode empregar uma plantadeira manual. A colheita acontece no período de floração ou no início das frutificação, o que ocorre por volta de 130 a 140 dias após o plantio.

Depois da colheita, os feixes com as hastes devem ser beneficiados e preparados para a produção das fibras, que serão empregadas na indústria. O preparo dessas fibras é longo: primeiro, os feixes ficam imersos em água por 15 a 20 dias. Depois, são lavados e colocados para secar por dois ou três dias, estendidos em varais. Depois desse processo, o produtor terá as fibras secas, prontas para a comercialização em fardos. Na Figura 5 é possível observar o ciclo de produção da juta.



Figura 05 - Ciclo de extração da juta: 1-Colheita; 2-Secagem; 3-Manufatura.
Fonte: Pires et al. (2009).

6.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as características e propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados na pesquisa, visando avaliar o comportamento da geogrelha de fibra de juta. Com a mistura asfáltica foi avaliado o fenômeno de reflexão de trincas e a contribuição estrutural do reforço no meio de duas camadas asfálticas, além disso, serão descritas as configurações dos ensaios executados e procedimento seguido para elaboração dos corpos de prova.

6.1 SELEÇÃO E COLETA DE MATERIAIS

O processo de seleção e coleta de materiais consistiu na avaliação dos possíveis locais para a aquisição dos materiais. Depois do reconhecimento dos principais estoques de material e definição das características adequadas para a elaboração de misturas asfálticas. Nesta fase da pesquisa foi definido que a brita, areia e o pó de pedra seriam adquiridos com o apoio das empresas parceiras Pedreira Mêrces e Britamazon, já o cimento asfáltico (CAP) foi conseguido graças à doação da Companhia Brasileira de Asfalto da Amazônia – CBAA, em Manaus, AM.

6.1.1 Fibras de juta

A fibra de juta (*Corchorus capsularis*) já beneficiada em carretel com aproximadamente 200 metros de fio foi adquirida pelo grupo CIEX através da empresa Jutal - Empresa Industrial de Juta S/A com sede na cidade de Manaus, Amazonas.

6.1.2 Análise Termogravimétrica (Tg)

A técnica TG é essencialmente aplicável quando se deseja acompanhar variações de massa envolvidas num experimento, sendo seus resultados fundamentalmente de ordem quantitativa. As curvas foram obtidas em um SDT Q600 de marca Ta Instrument, localizado no laboratório de Ensaios Físico-Químicos/FT/UFAM. A amostra foi aferida a aproximadamente 10 mg, a taxa de aquecimento foi de 10 °C/min até a temperatura final de 800 °C, com fluxo de gás N 5.0 de 30 ml/min. O cadinho utilizado nos testes foi o de alumina de 90 microlitros sem tampa.

6.1.3 Materiais para elaboração de misturas asfálticas

A preparação de misturas asfálticas convencionais requer que os dois materiais envolvidos (asfalto e brita) tenham a melhor compatibilidade ao longo do tempo de serviço do revestimento, frente às condições prevaletentes de ambiente e carregamento de carga. Das propriedades individuais dos materiais constituintes vai depender o desempenho final da mistura. A dosagem dos materiais foi realizada por meio de ensaios de laboratório, que avaliaram o teor mínimo de cimento asfáltico para atingir as propriedades estabelecidas em normas para deformação, resistência e volume de vazios.

6.1.4 Materiais granulares

Após análise preliminar dos fornecedores de brita e pó de pedra em Manaus, foi decidido que as empresas parceiras Pedreiras Mêrces e Britamazon providenciariam os agregados pétreos que, por inspeção visual, contassem com características apropriadas para elaboração de misturas asfálticas. As características avaliadas visualmente foram forma e presença de impurezas.

As britas fornecidas correspondiam às que comercialmente são denominadas como Brita 0, Brita 1 e Pó de pedra. A coleta do material foi realizada atendendo princípios de segurança e qualidade, para obter amostras que não estivessem contaminadas com materiais que pudessem afetar a execução e o comportamento da mistura asfáltica.

6.1.5 Cimento asfáltico

O cimento asfáltico selecionado para a pesquisa foi aquele comercialmente conhecido como CAP 50-70. O nome deste material deve-se à consistência avaliada por meio do ensaio de penetração, este ensaio consiste em penetrar uma amostra de cimento asfáltico de volume padronizado com uma agulha e uma massa de 100 g a uma temperatura de 25 °C. O cimento asfáltico foi cedido pela empresa parceira deste projeto, Companhia Brasileira de Asfalto da Amazônia – CBAA, que fica no município de Manaus, Amazonas.

Para evitar um envelhecimento antecipado do material, ele foi manipulado a uma temperatura que permitia uma viscosidade suficiente de modo a obter as amostras diretamente do veículo de transporte. Durante o processo de amostragem do asfalto diretamente do veículo de transporte, foram desprezados aproximadamente três litros de material para evitar a coleta do

ligante com resíduos procedentes das descargas antecedentes. Além disso, foram tomadas todas as precauções necessárias para evitar que a amostra fosse contaminada com água ou solventes que pudessem prejudicar o comportamento posterior da mistura asfáltica. A coleta foi feita em recipientes metálicos de trinta litros de capacidade para facilitar o manuseio e transporte.

6.1.6 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado para o balanceamento de solo cimento foi o produzido e comercializado pela empresa Cimento Fort Ltda., com o nome de Cimento Fort. A referência comercial do produto é CP II-E-32, que é um cimento Portland composto, cuja composição é intermediária entre os cimentos Portland comum (CP I e CP I S) e os cimentos Portland com adições (alto-forno e pozolânica). Suas propriedades atendem desde estruturas de concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento, concreto massa e concreto para pavimentos. O cimento Portland CP II-E-32 possui secagem rápida, além de maior resistência inicial e final.

6.1.7 Areia

A areia utilizada foi doada pela empresa Polimix Concreto, localizada na cidade de Manaus. É uma areia de jazida e obedece ao que tange as normas NBR NM 248 (2003), NBR NM 46 (2003), NBR NM 45 (2006) e NBR NM 27 (2001).

6.1.8 Verniz

O verniz utilizado como material impermeabilizante é um produto disponível no comércio local a base de copolímeros acrílicos em emulsão, com a finalidade de tornar as fibras de juta menos higroscópicas, além da ação antibacteriana e antifúngica, presentes em sua formulação. Tal produto apresenta as seguintes propriedades físico-químicas, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades físico-químicas do verniz

Propriedades físico-química	
Cor: transparente	Peso específico: 1,005 - 1,045 g/cm
Brilho: (60°): não aplicável	Voc (compostos orgânicos voláteis): 76,59%
Sólidos/volume: 27 - 31%	Ponto de fulgor: 37°C
Sólidos/peso: 28 - 32%	

Fonte: AkzoNobel Tintas Decorativas do Brasil (2018)

7.0 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os ensaios de caracterização físico-mecânicos da fibra de juta e dos agregados (brita, areia e cimento) foram realizados na Universidade Federal do Amazonas – UFAM, no LABPAV - Laboratório de Pavimentação e LEM – Laboratório de Ensaio de Materiais e o ensaio químico de termogravimetria nas amostras de fibra foi realizados na Universidade Federal do Amazonas – UFAM, no Laboratório de Materiais – LABMAT.

7.1 AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

O número de rudimentos máximos e granulometria de um material estão definidos por uma especificação de serviço que muda dependendo da aplicação do material. O desempenho da camada asfáltica em serviço está diretamente coerente com a distribuição granulométrica. Por exemplo, para que um agregado alcance uma alta estabilidade frente aos efeitos das cargas, deve ter um ângulo de atrito elevado, que vai depender da massa específica que atinge durante o processo de compactação, a qual é função da proporção de frações grossas e finas presentes no material.

Os aglomerados com pouco ou nenhum material fino (passante na peneira # 200) obtém sua estabilidade mediante o contato entre partículas, o que gera uma baixa massa específica e alta permeabilidade. Ao adverso, os aglomerados com quantidade de finos satisfatórios para encher os vazios entre as partículas alcançam maior estabilidade, massas específicas maiores, baixa permeabilidade e maior resistência. Já os materiais com um excesso de solos finos, perdem o contato entre partículas, as partículas grossas ficam flutuando no meio do solo fino, a massa específica é baixa e a permeabilidade decresce.

7.1.1 Granulometria por peneiramento

Na avaliação da distribuição granulométrica das britas e da areia para elaboração da mistura asfáltica, foi utilizada a norma DNER-ME 083/98 (Agregados - Análise Granulométrica), onde os resultados são expressos em forma de Tabela ou gráfico. As peneiras utilizadas mudaram em função das duas especificações de serviço utilizadas: DNER 142/2010 – ES (Gradações base melhorada com cimento) e DNIT 031/2006-ES (Gradações concreto asfáltico). Nas Tabelas 4 e 5 são apresentadas as faixas granulométricas exigidas pelas especificações.

Tabela 4 Faixas granulométricas base melhorada com cimento, (norma DNER 142/2010 – ES).

Peneiras	pol.	2"	1"	3/8"	Nº 4	Nº 10	Nº 40	Nº 200
	mm	50,8	25,4	9,5	4,8	2	0,42	0,074
Faixas	A	100	-	30-65	25-55	15-40	8-20	2-8
	B	100	75-90	40-75	50-60	20-45	15-30	5-15
	C	-	100	50-85	35-65	25-50	15-30	5-15
	D	-	100	60-100	50-85	40-70	25-45	5-20

Tabela 5 Faixas granulométricas concreto asfáltico (norma DNIT 031/2006 –ES).

Peneiras	pol.	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4	Nº 10	Nº 40	Nº 80	Nº 200
	mm	50,8	38,1	25,4	19,1	12,7	9,5	4,8	2	0,42	0,18	0,074
Faixas (% em massa passando)	A	100	95-100	75-100	60-90	-----	35-65	25-50	20-40	10-30	5-20	1-8
	B	-----	100	95-100	80-100	-----	45-80	28-60	20-45	10-32	8-20	3-8
	C	-----	-----	-----	100	80-100	70-90	44-72	22-50	8-26	4-16	2-10

7.1.2 Avaliação da textura e forma das partículas

A textura superficial dos agregados pétreos está diretamente relacionada com a trabalhabilidade, a qual se define como a facilidade com que são misturados agregados pétreos e asfálticos. Desta propriedade depende o desempenho da mistura, sua facilidade de instalação, compactação, aderência com o ligante asfáltico e a resistência ao atrito. Tem-se que as frações com superfícies circulares apresentam um menor contato entre partículas em comparação com um agregado britado, o que reduz a capacidade estrutural frente à ação das cargas impostas pelos veículos.

A forma das partículas dos agregados influi na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e muda a energia de compactação necessária para alcançar uma determinada densidade. Partículas irregulares ou de forma angular, tais como pedra britada, cascalhos e algumas areias de brita, tendem a oferecer melhor intertravamento entre os grãos quanto mais cúbicas forem as partículas e mais afiladas forem suas arestas (Bernucci *et al.*, 2006).

7.1.3 Índice de forma

A forma das partículas é analisada pela determinação do índice de forma (f) seguindo o procedimento padronizado pela norma DNER-ME 086/94 (Agregado - Determinação do Índice de Forma). O índice varia de 0,0 a 1,0, sendo o agregado considerado de ótima cubicidade quando $f = 1,0$ e lamelar quando $f = 0,0$. É adotado o limite mínimo de $f = 0,5$ para aceitação de agregados quanto à forma. O ensaio consiste basicamente na estimativa de uma amostra representativa de brita escolhida em função da granulometria do material. A quantidade de material é escolhida tendo em conta a percentagem que representa melhor o material, ou seja, as frações são escolhidas em função daquelas que tenham uma percentagem maior presente no material. A amostra é inicialmente peneirada entre dois crivos circulares com a finalidade de restringir a forma das partículas que vai ser avaliada. Depois de selecionada a amostra, todas as partículas são testadas no primeiro crivo (maior) e as partículas que passam são testadas no crivo II (crivo menor). Uma vez terminado o procedimento, são registradas as massas das partículas retidas, repetindo-se o procedimento para cada uma das frações avaliadas.

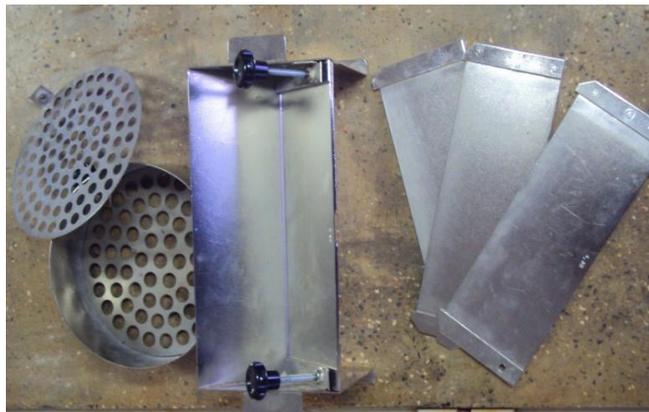


Figura 06 - Crivo redutor e peneira circular para ensaio de índice de forma.

7.1.4 Partículas fraturadas

A angularidade do agregado graúdo aumenta o ângulo de atrito do solo. As partículas fraturadas são definidas como a porcentagem em peso de agregado maiores do que 4,75 mm com uma ou mais faces fraturadas. O grau de aderência do ligante asfáltico com o agregado também está relacionado com a textura superficial, devido às partículas com faces mais fraturadas oferecerem uma melhor aderência, gerando um melhor comportamento da mistura. A maioria das especificações concordam que o valor mínimo de partículas com duas ou mais

faces fraturadas que, em função do número de repetições do eixo padrão, variam entre 55 e 100 %, sendo 55 % um valor de referência para rodovias com baixo volume de tráfego e 100 % para rodovias com elevado número de veículos.

Nesta pesquisa o ensaio para a determinação da percentagem de partículas fraturadas em agregados grossos, foi realizado de acordo com a norma ASTM D 5821-95.

7.1.5 Angularidade da Areia

A angularidade do agregado miúdo é definida como a porcentagem de vazios presentes em agregados com tamanhos de partículas menores que 2,36 mm, em uma condição de estado solto (Bernucci *et al.*, 2006). O procedimento consiste em deixar cair livremente uma amostra representativa de agregado miúdo em um funil de características e posição padronizadas para um cilindro de volume conhecido. Uma vez cheio o cilindro, o excesso de areia é retirado e a massa é registrada. O valor de referência para misturas asfálticas tem que variar entre 40 e 45 %.

7.1.6 Avaliação da Limpeza do material

Alguns agregados pétreos contêm certos materiais que os tornam impróprios para utilização em revestimentos asfálticos, a menos que a quantidade desses materiais seja pequena. São materiais deletérios típicos tais com: vegetação, conchas e grumos de argila presentes sobre a superfície das partículas do agregado graúdo.

Geralmente a expurgação e o grau de nocividade dos materiais para elaboração de mistura asfáltica são avaliados primeiramente de maneira visual e posteriormente mediante os ensaios de equivalente de areia. Na maioria das vezes, tem-se que se restringir a quantidade de materiais nocivos para evitar problemas de aderência entre os agregados pétreos e o ligante asfáltico com o objetivo de evitar reações prejudiciais entre o cimento e tais materiais, além de reduzir os problemas relacionados com a expansão da camada.

7.1.7 Dureza do material

Os agregados pétreos são submetidos, inicialmente, à ação abrasiva dos equipamentos de britagem e o atrito entre tal material se acrescenta no processo de elaboração, instalação e compactação da mistura e posteriormente durante a vida de serviço. É por isso que os agregados

têm que ser resistentes aos efeitos de britagem, degradação e desintegração. A dureza do material é função da procedência mineralógica da rocha de origem e grau de intemperismo, entre outros fatores. Para a avaliação da perda de material por abrasão foi utilizado o ensaio de Abrasão Los Angeles (norma DNER – ME 035/98).

7.1.8 Dosagem Marshall

A dosagem de uma mistura asfáltica consiste na seleção, através de procedimentos experimentais, de um teor ótimo de ligante, a partir de uma faixa granulométrica prevista. O teor de ligante asfáltico para o projeto varia de acordo com o método de dosagem, e é função de parâmetros como energia de compactação, tipo de mistura, temperatura a qual o pavimento estará submetido, entre outros. O procedimento de dosagem mais usado mundialmente faz uso da compactação por impacto e é denominado método Marshall em referência ao engenheiro Bruce Marshall que o desenvolveu na década de 1940, (Bernucci *et al.*, 2006).

O objetivo da utilização do método Marshall, foi conferir se o teor de asfalto teórico atingia as especificações da norma DNIT 031/2006.

Para avaliar a massa específica aparente de amostras compactadas e massa específica máxima medida, foram seguidos os procedimentos estabelecidos pelas normas: ASTM D 272600 e ASTM D 2041-00.

Para a determinação da estabilidade e fluência no laboratório, foram seguidos os procedimentos padronizados pela norma ASTM D 5581/2013.

Os resultados dos ensaios realizados sob os corpos de prova marshall, que avaliaram as propriedades mecânicas, para o teor de asfalto escolhido serão apresentados posteriormente em outro capítulo deste trabalho.



Figura 07 - (a) Máquina de ensaio Marshall - UFAM; (b) corpos de prova Marshall

7.1.9 Ensaio Cântabro

O ensaio Cântabro foi desenvolvido na Espanha (Universidade de Catalunha) e utiliza a máquina de abrasão Los Angeles. No Brasil esse procedimento é normatizado para a avaliação de abrasão em misturas betuminosas com asfalto polímero pelo método de ensaio DNER ME 383/99. A norma NBR 15140 descreve o ensaio de determinação do desgaste por abrasão Cântabro em misturas asfálticas.

O procedimento consiste, em moldar corpos de prova Marshall com elevado volume de vazios e submetê-los, um de cada vez, a 300 revoluções da máquina de abrasão Los Angeles, sem as esferas, a uma rotação de 30 rpm a 33 rpm. Moldam-se cinco corpos de prova e, após um período 6 horas de repouso à temperatura de 25 °C, realiza-se o ensaio. Em seguida, retira-se o corpo de prova da máquina e determina-se a sua massa. Calcula-se o índice de perda de massa do ensaio Cântabro fazendo a relação entre a massa perdida e a massa inicial do corpo de prova.

Considera-se aceitável uma perda de 25 % de massa no ensaio.

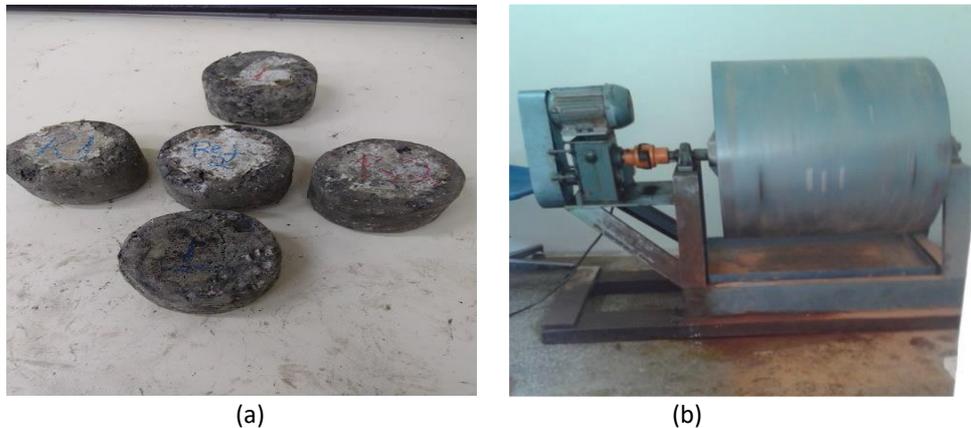


Figura 08 – (a) corpos de prova de ensaio Cântabro e (b) máquina de ensaio Cântabro

Existe ainda um condicionamento opcional que pode ser realizado antes da execução do ensaio para avaliar a ação da água na mistura asfáltica. Este condicionamento consiste em submeter as amostras a um banho de água a 60 °C por um período de 24 horas seguido por um banho a 25 °C por um período de 24 horas.

7.1.10 Ensaio de Umidade Induzida

A susceptibilidade das misturas ao dano por umidade induzida foi avaliada através do ensaio Lottman modificado (ABNT NBR 15617:2015). O ensaio avalia as propriedades de adesividade ligante-agregado em misturas asfálticas, considerando o efeito deletério da água

em suas propriedades mecânicas (Specht, 2004). Este procedimento é indicado para avaliação de misturas mornas por conta da possibilidade destas misturas apresentarem maior umidade residual, função da menor temperatura de usinagem (Hurley e Prowell, 2006 e Kvasnak et al., 2009). Este ensaio muitas vezes é considerado como o principal ponto de aprovação destas misturas mornas. Por outro lado a inserção de RAP pode aumentar a resistência quanto a umidade porque este material já apresenta uma fina película de CAP sobre os agregados.

A ABNT NBR 15617: 2015 recomenda a moldagem de no mínimo seis corpos de prova, que devem apresentar um volume de vazios de 7 ± 1 %, mencionada também na AAHSTO T283-2018 que é citada no método de dosagem AASHTO M 323-2017. As amostras são rompidas em testes de resistência à tração indireta. Os corpos de prova são divididos em dois grupos:

Grupo I

-Corpos de prova condicionados a 25 °C e submetidos à ruptura por compressão diametral. Obtém-se o valor de RT1.

Grupo II

-Os corpos de prova são imersos em água e submetidos a uma pressão de vácuo, de forma que o grau de saturação atinja valores entre 70 e 80 %;

-Os corpos de prova semi-saturados são inseridos em sacos plásticos contendo aproximadamente 3,0 mL de água;

-A seguir, as amostras são colocadas em um freezer à temperatura de -18 °C por um período mínimo de 18 horas;

-Os corpos de prova são então condicionados em água destilada à temperatura de 60 °C por um período de 24 horas;

-Os corpos de prova passam por um segundo condicionamento em água destilada à temperatura de 25 °C por um período de 2 horas;

-As amostras são finalmente rompidas em testes de compressão diametral a uma taxa de deformação de 0,8 mm/min e a resistência à tração do segundo grupo (RT2) é calculada.

A razão entre RT2 e RT1 é denominada Resistência Retida à Tração ($RRT = RT2 / RT1$). Um valor mínimo de RRT de 70 % tem sido tipicamente recomendado para a geração de misturas resistentes ao dano induzido por umidade quando se faz todo este condicionamento, mas em muitas normas a exigência é de 80 %.



Figura 09 - corpos de provas emergidos em água (b) corpos de provas em pressão de vácuo

O valor obtido desta relação pode ser utilizado para prever o desempenho de misturas asfálticas, em campo (4 a 12 anos) quanto à adesividade ligante/agregado. Este ensaio analisa também o efeito da adição de aditivos químicos ou pulverulentos na adesividade da mistura (SPECHT, 2004).

Na presente pesquisa este ensaio foi usado para avaliar as misturas analisadas. Admitiu-se o valor de 80 % como o adequado para decidir sobre a qualidade da adesividade ligante-agregado, segundo proposto em NCHRP (2011).

7.1.11 Resistência à tração por compressão diametral

Esse ensaio, normatizado em norma DNIT 136/2010 - ME e ABNT NBR – 15087, é realizado em prensa Marshall convencional, onde se posiciona o corpo de prova inserido em um dispositivo com dois frisos metálicos e guia. Os frisos se apóiam em duas geratrizes opostas do corpo de prova.



Figura 10 – Prensa Marshall – UFAM

O ensaio foi realizado à temperatura de 25 °C com velocidade de avanço da prensa de 0,8 mm/s.

Com o valor da carga de ruptura (F) já corrigida pela constante da prensa, foi calculada a resistência à tração por compressão diametral, cuja formulação é dada pela equação:

$$\sigma_R = 2F / \pi DH$$

Onde:

σ_R – resistência à tração, kgf/cm²;

F – carga de ruptura, kgf;

D – diâmetro de corpo de prova, cm;

H – altura do corpo de prova, cm;

Ou,

$$\sigma_R = 2F / 100 \pi DH$$

Onde:

σ_R – resistência à tração, MPa;

F – carga de ruptura, N;

D – diâmetro de corpo de prova, cm;

H – altura do corpo de prova, cm.

Foram realizados ensaios de resistência à tração em corpos de prova previamente condicionados e também em corpos de prova sem condicionamento. Em todos os casos, respeitou-se o tempo de duas horas na temperatura de 25 °C antes da realização do ensaio.

Cabe ressaltar que os corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à tração foram exclusivamente moldados para esse fim não sendo submetidos previamente a ensaios de módulo de resiliência.

7.1.12 Microscopia das geogrelhas.

Utilizando um estereoscópio, localizado no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, marca Leica modelo EZ4, suíço, com sistema óptico incorporado à estativa, sistema óptico *zoom* fator 4,4:1, para aumentos contínuos de 8 a 70 vezes de seu tamanho, iniciaram-se as observações em nível microscópico.

1° Passo: Prepara-se uma amostra de material, uma geogrelha de juta, realizando cortes sem danificar os fios. Separa-se também uma folha de papel milimetrado para servir de fundo e parâmetro de comprimento dos elementos;

2° Passo: Inicia-se as observações aumento a gradação da lente em 30x, primeiramente nas junções entre os elementos transversais e longitudinais, verificando-se a ocorrência de alguma falha ou defeito de emenda;

3° Passo: Prossegue-se no ensaio (aumento de gradação da lente em 50x), verificando-se as tramas de entrelaçamento da fibra, e a ocorrência de alguma falha ou defeito; e

4° Passo: Continuam-se as observações (aumento de gradação da lente em 70x), agora verificando-se os próprios fios da fibra de juta, a cor, alguma ocorrência de falha ou defeito e a verificação da espessura do fio.

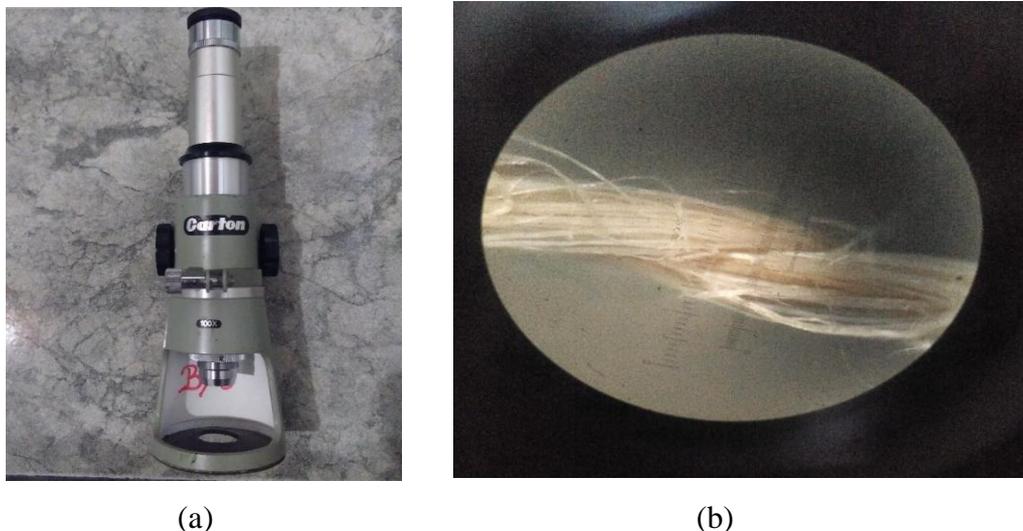


Figura 11 – (a) estereoscópio para ensaio e (b) imagem ampliada da fibra pelo aparelho de estereoscopia.

7.1.13 Ensaio de arrancamento.

O ensaio de arrancamento é um ensaio onde se realiza o arrancamento de uma geogrelha confinada em uma caixa de testes, em modelo reduzido, com solo e camada asfáltica compactado dentro da mesma.

Dentro da caixa de testes é instalada uma célula de tensão total para medição da tensão de confinamento de solo, simulada por uma força de compressão lateral exercida por uma borracha inflável presa na tampa da caixa; na tampa, liga-se uma mangueira que transfere ar comprimido oriundo de um compressor de ar.

O equipamento reduzido é composto por uma caixa de testes metálica, com lâmina de aço A36, espessura de 1,02 mm, com 250 mm de comprimento, 300 mm de largura e 150 mm de

altura, resultando num volume de $0,01125 \text{ m}^3$, conforme apresentado na figura 12 (a). A camada asfáltica é compactada nesta caixa, em duas camadas, sendo inserida entre as camadas uma amostra de geogrelha. O ensaio consiste na tração da amostra de geogrelha inserida entre as camadas de asfalto compactado na caixa. A força de tração e o deslocamento da geogrelha são os resultados do ensaio de arrancamento.

A caixa possui um bico metálico onde foi acoplado uma mangueira de um compressor de ar, marca Chiaperini, modelo Top, com 110 litros e um motor de 2 HP de potência. Esse compressor atua de forma a realizar pressão no solo, que está confinado na caixa de teste para simulação de uma carga na direção horizontal (tensão de confinamento), para que isto ocorra, existe uma borracha que infla, pressionando o solo ao asfalto confinado na caixa. Utiliza-se uma máquina universal fabricada pela TOKIO Testing Machine MFG. CO. Ltda., modelo RAT NO. 30, com capacidade de 300 kN, para realizar a força de tração de arrancamento da geogrelha implantada no meio da camada asfáltica na caixa de testes.



Figura 12 - Equipamento reduzido de laboratório. (a) Caixa metálica de testes de arrancamento. (b) Colocação e compactação de solo na caixa de testes.

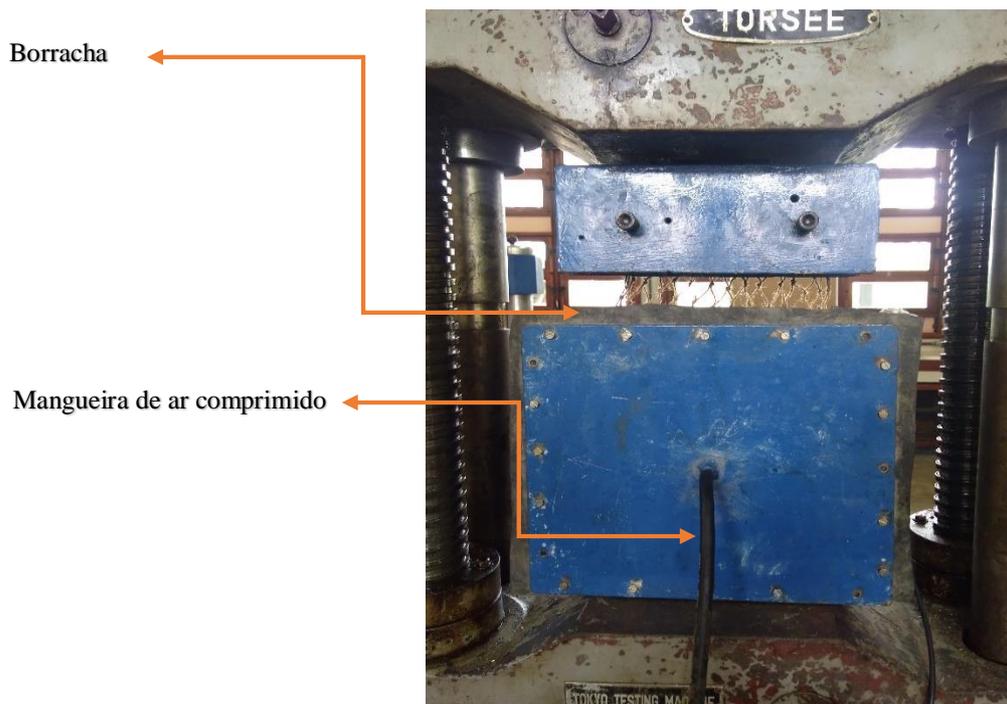


Figura 13 – Borracha que infla, pressionando o solo ao asfalto confinado, com o intuito de simular o confinamento natural do solo/asfalto na caixa de ensaio.

No interior da camada de solo confinado foi implantada uma célula de tensão total cilíndrica CT ZL/5T, com capacidade para 5.000 kgf (50 kN), com indicador digital MK 5T, que serve para medição e calibração da célula de carga supracitada.

O solo foi compactado dentro da caixa de teste, em uma camada, com 26 golpes, para simular a energia de compactação do Proctor Normal. Na primeira camada foi implantada a célula de carga CT ZL/5T, para medição da pressão horizontal ocasionada pela pressão da borracha inflável, na segunda camada foi acrescentada uma camada asfáltica e em seu centro a amostra de geogrelha e, finalmente, a última camada de asfalto compactado com 75 golpes.

Então, procedeu-se ao lacre da caixa de testes, parafusando a tampa superior, que possui uma borracha acoplada, objetivando o inflamento por parte do ar comprimido enviado pelo compressor alojado no laboratório, simulando, dessa forma, a tensão de confinamento da amostra de solo na caixa. A célula de carga fica ligada ao medidor digital, podendo-se desta forma medir-se a carga de confinamento do solo, mesmo durante a tração de arrancamento da geogrelha de teste.

A garra metálica foi projetada para resistir aos esforços aplicados na geogrelha inclusa na camada asfáltica na caixa de teste, para isto, as peças metálicas foram construídas de aço maciço, com o intuito de evitar o “esmagamento” da haste cilíndrica e das garras. As garras

possuem dentes metálicos que não estão afiados, para se evitar que a geogrelha de fibra de juta seja cortada pelos dentes metálicos da garra durante o ensaio de arrancamento.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 14 - Equipamento reduzido de laboratório. (a) Compressor de ar 110 litros, com potência de 2HP. (b) Célula de carga CT ZL/5T com indicador digital MK 50 kN. (c)&(d) Caixa de ensaio e implantação da célula de carga em um orifício da caixa de ensaio.

A pressão de ar na borracha inflável, na tampa da caixa de testes, é controlada por um manômetro e uma válvula reguladora. Garante-se assim que a sobrecarga seja aplicada de forma homogênea e constante sobre toda a superfície de solo compactado no interior da caixa, de acordo com a Figura 15.



Figura 15 – Tampa com borracha inflável para simular a tensão confinante do solo.

Procedimentos aplicados para a realização do ensaio:

1º Passo: O solo da amostra foi seco à sombra e posteriormente peneirado na malha #4, a fim de garantir uma homogeneização;

2º Passo: Passar graxa nas paredes da caixa para instalação de duas camadas de material sintético, com o intuito de reduzir a rugosidade das paredes internas. Após revestidas todas as paredes internas, iniciou-se a compactação da camada de solo, então inseriu-se a célula de tensão total, através de um orifício de 30 mm de diâmetro por 20 mm de profundidade, escavado no solo compactado na caixa de testes. Em seguida, implantou-se a célula de tensão total CTZ/5T, de tal forma que ficasse aproximadamente 10 mm abaixo da geogrelha;

3º Passo: Foi posto a primeira camada de mistura asfáltica e feito também sua primeira compactação com 75 golpes na primeira camada, logo após foi colocada a geogrelha com dimensões de 30 cm de largura e, no interior da caixa, adotou-se 25 cm de comprimento e novamente foi colocada mais uma camada de mistura asfáltica e compactada com mais 75 golpes;

4º Passo: Fixou-se com parafusos a tampa à caixa e o conjunto preso à base da máquina universal de ensaio. Aplicou-se, em seguida, a sobrecarga através de ar comprimido.

Finalmente, fixou-se a geogrelha à garra de tração, com cuidado para protegê-la contra eventuais danos no aperto da garra, e realizou-se o ensaio de tração para arrancamento da geogrelha; e

5º Passo: Realizou-se o ensaio de arrancamento, registrando-se a carga máxima de resistência ao arrancamento e o deslocamento.



(a)



b)



(c)



(d)

Figura 16 – Ensaio de Arrancamento de geogrelha. (a) Aquecimento de CAP; (b) Aquecimento e mistura dos agregados; (c) Compactação e Instalação da célula de tensão total CTZ/5T executada em duas camadas e energia do Proctor Normal; (d) Compactação da camada asfáltica.

Para todos os ensaios de arrancamento realizados o comprimento não confinado da geogrelha foi de 11 centímetros (l_0), entre a garra de mordedura e a face frontal do equipamento.

Os procedimentos para leitura do deslocamento da geogrelha durante o ensaio foram:

1º Passo: Iniciou-se o ensaio com o comprimento inicial de 11 cm (l_0);

2º Passo: De acordo com cada força aplicada, anotou-se o valor do deslocamento (Δl) devido à deformação da geogrelha, no trecho não confinado;

3º Passo: Ao final do ensaio, obteve-se o deslocamento total (D_t), então subtraiu-se o deslocamento (Δl) do deslocamento total (Δ_t), obtendo-se o deslocamento real (Δ_r);

O tamanho da amostra de geogrelha adotada foi o sugerido por KAKUDA (2005), uma amostra de 30 cm de largura por 25 cm de comprimento, a ser inserida no interior da caixa de testes. Dessa forma, adotaram-se estas dimensões como padrão nos ensaios realizados.

Durante os ensaios de arrancamento, registraram-se as variáveis de velocidade, força resistente ao arrancamento, deslocamento e leitura da célula de carga.

8.0 GEOGRELHA EMPREGADA

Para a realização dos ensaios descritos nesta dissertação foi utilizado como tipo de reforço uma geogrelha manufaturada no LABPAV – Laboratório de Pavimentação – UFAM, com fibra de juta. Esta geogrelha usada como reforço é descrita abaixo.

8.1 GEOGRELHA DE FIBRA NATURAL DE JUTA

As geogrelhas utilizadas para esta pesquisa, foram manufaturadas no laboratório de pavimentação da Universidade Federal do Amazonas, sendo produzidas a partir de filamentos contínuos de fibras de juta, com aberturas com de 12 mm x 12 mm, com tamanho de 120 cm x 120 cm. Pode ser aplicado na diminuição do tempo de reflexão de trincas em revestimentos asfálticos.

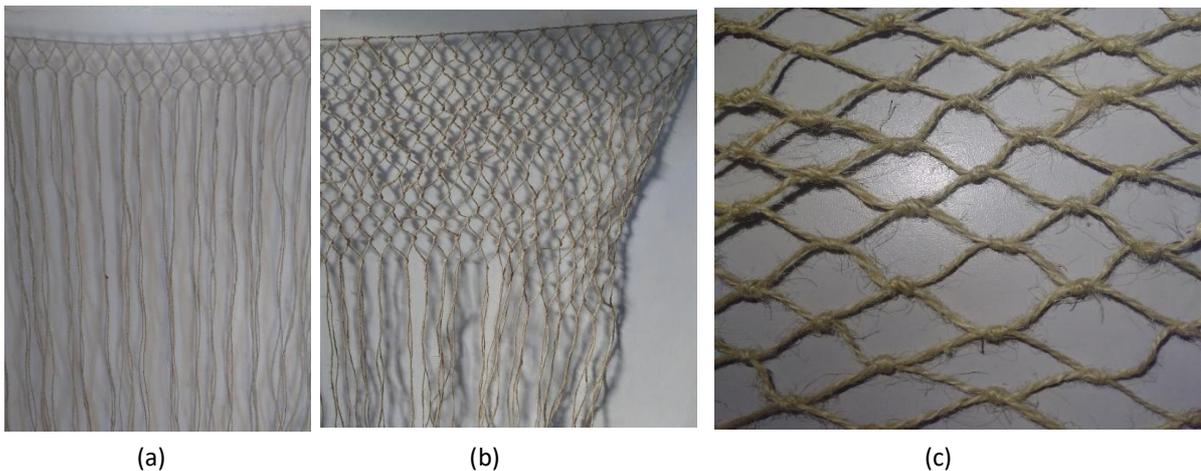


Figura 17 – (a) e (b) Fabricação e (c) geogrelha de fibra de juta

9.0 RESULTADOS DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E DOSAGEM DE MATERIAL

No presente capítulo da pesquisa serão apresentados os resultados obtidos para as diferentes configurações dos ensaios realizados no trabalho e suas respectivas análises. Inicialmente, será exposta a caracterização e a dosagem dos materiais para obter o teor ótimo de cimento asfáltico.

9.1 AVALIAÇÃO DA GRANULOMETRIA

Para se conhecer a harmonia de mistura de Brita 0, Brita 1 e Pó de pedra de modo a se atingir a faixa granulométrica média da especificação DNIT 031/2006 foram realizados os ensaios granulométricos. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 06. Os três materiais analisados de caráter individual não atingiram a especificação requerida, tal como apresenta a Tabela 06. As britas 0 e 1 são materiais mal graduados com carência de partículas finas e, segundo o sistema de classificação SUCS, seriam classificadas como bem graduadas se o Coeficiente de Uniformidade (C_u) fosse maior que 6 e se o Coeficiente de Curvatura (C_c) estivesse compreendido entre 1 e 3. Logo, o pó de pedra é classificado como uma areia siltosa (SM) com carência de pedregulhos, o que o torna impróprio para ser usado em misturas asfálticas. O material que mais se aproximou aos limites da faixa granulométrica foi a brita 0. Seu uso, porém, ainda é inadequado, pois sua granulometria é graúda e próxima ao limite inferior do DNIT, o que poderia gerar um mistura com altos volumes de vazios e de difícil compactação.

Tabela 06 - Granulometria dos materiais para confecção da mistura asfáltica.

PENEIRA		PERCENTAGEM PASSA			% PASSA DNIT 031/2006	
		BRITA 00	BRITA 01	PÓ DE PEDRA	Limite Inferior	Limite Superior
#	(mm)					
1"	25,4	100,0%	100,0%	100,0%	100%	100%
3/4"	19,1	100,0%	85,2%	100,0%	100%	100%
1/2"	12,7	99,7%	30,9%	100,0%	80%	100%
3/8"	9,5	94,6%	8,8%	100,0%	70%	90%
Nº4	4,75	48,5%	1,7%	99,2%	44%	72%
Nº10	2	21,7%	1,4%	65,8%	22%	50%
Nº40	0,42	10,9%	1,3%	25,5%	8%	26%
Nº80	0,18	9,1%	1,2%	18,5%	4%	16%

Nº200	0,075	7,1%	1,1%	14,4%	2%	10%
Cu		20,74	1,6	-----	-----	-----
Cc		5,1	1,9	-----	-----	-----
Classificação		GP-GM	GP	SM		
SUCS					-----	-----

De acordo com a Figura 18, nenhum dos três materiais isoladamente é apropriado para a confecção da mistura asfáltica, sendo necessário efetuar uma dosagem para se atender às especificações.

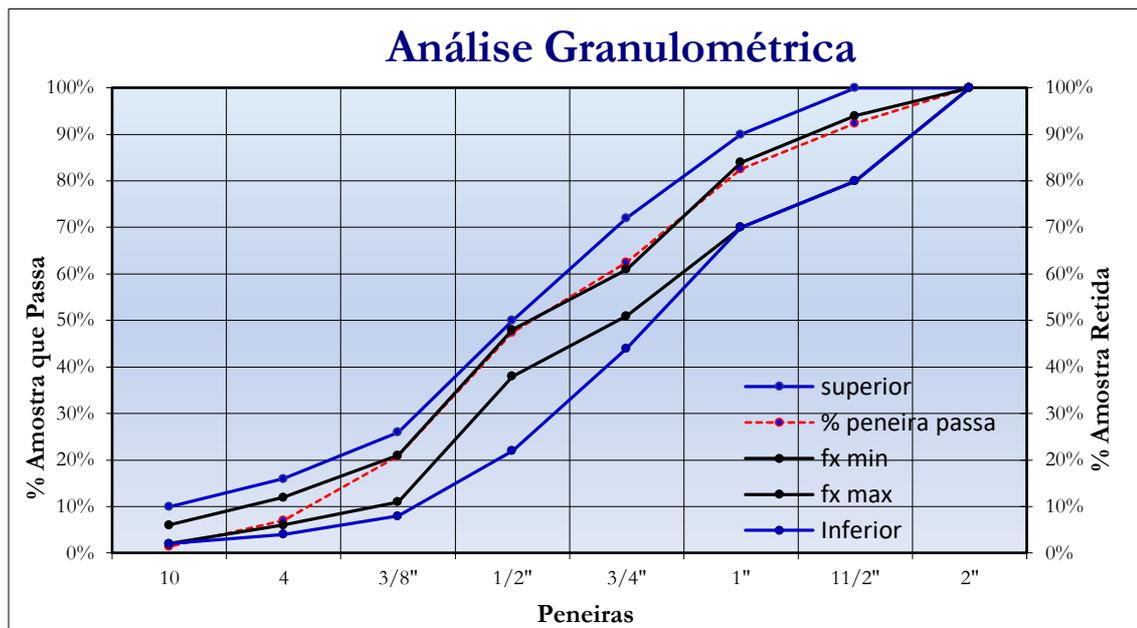


Figura 18 - Curvas granulométricas Brita 0, Brita 1, Pó de Pedra e Material Misturado.

Uma vez realizada a análise da dosagem dos aglomerados, foi determinado que a melhor combinação de materiais para obter uma granulometria média entre os limites inferior e superior foi 60 % de brita 0, 10 % de brita 1 e 30 % de pó de pedra. As porcentagens de materiais sugeridas se referem à dosagem em medida de massa. Na Figura 18 é apresentada a mistura dosada a partir da combinação dos materiais utilizados na mistura asfáltica.

9.2 Avaliação da textura e forma das partículas.

A avaliação da textura e da forma foi realizada por meio dos ensaios de índice de forma, partículas fraturadas e angularidade da areia. Os ensaios foram realizados em amostras representativas de material misturado CBUQ. Os resultados dos ensaios realizados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 07 - Resultados da avaliação de textura e forma

Nome do ensaio	Norma Utilizada	Resultado	Unidade	Especificação DNIT 031/2006	Especificação DNER 142/2010
ÍNDICE DE FORMA	DNER 086/94	0,60	-----	> 0,50	-----
PARTÍCULAS FRATURADAS	ASTM D 5821-95	96,0	%	55 - 100% **	-----
ANGULARIDADE DA AREIA	ASTM C 1252-98	42,5	%	> 40%	-----

** Especificação em função do nível de tráfego

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 07, o material para mistura CBUQ cumpre a especificação para a elaboração da mistura asfáltica. A fração maior que 4,75 mm de diâmetro apresentou um índice de forma maior que 0,50, o que garante partículas de forma cúbica. A percentagem de partículas fraturadas apresenta valores perto de 100 %, o que garante que o material tem uma textura superficial adequada para misturas asfálticas. Quanto à angularidade da areia, foram obtidos valores maiores do que os especificados, o que garante que a fração miúda terá um comportamento adequado em serviço em relação às deformações permanentes. Os resultados obtidos confirmam um processo de britagem de todo o material, tanto na fração grosseira como na fração miúda.

9.3 Avaliação da limpeza do material

A avaliação da limpeza do material foi realizada por meio dos ensaios de equivalente de areia e de teor de material que passa na peneira nº 200, os ensaios foram realizados em amostras representativas dos materiais misturados para a elaboração de misturas asfálticas. O material passante na peneira nº 200 foi avaliado por meio do ensaio de granulometria. O ensaio de equivalente de areia foi realizado para amostras passantes na peneira nº 4. Na Tabela 08 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 08 - Resultados dos ensaios da avaliação de limpeza

Nome do ensaio	Norma Utilizada	Resultado	Unidade	Especificação DNIT 031/2006	Especificação DNER 142/2010
Passante peneira nº 200	DNER 086/94	8,7	%	2% - 10%	5% - 15%
Equivalente de Areia	ASTM D 5821-95	64,0	%	≥ 55%	-----

Dos resultados obtidos na ponderação da limpeza do material pode-se dizer que os agregados que foram submetidos ao ensaio atingem todas as especificações de limpeza, apresentando um teor de material passante na peneira nº 200, 8,7 % inferior ao limite máximo, que é de 10 %. O equivalente de areia foi de 64 %, apresentando 9 % a mais do mínimo valor especificado pela norma. Assim, a mistura dos três materiais (Brita 0, Brita 1 e Pó de pedra) cumpre satisfatoriamente as especificações de limpeza para a confecção da mistura asfáltica. A especificação DNER 142/2010 não requer valores para o equivalente de areia.

9.4 Avaliação da dureza dos materiais

A avaliação da dureza do material foi realizada em amostras representativas de mistura de CBUQ. O ensaio realizado para verificação desta característica foi o de abrasão Los Angeles. Os resultados do ensaio são apresentados na Tabela 09.

Tabela 09 - Resultados de ensaios de Abrasão Los Angeles.

Norma Utilizada	Resultado	Unidade	Especificação DNIT 031/2006	Especificação DNER 142/2010
DNER ME 035/98	15,6	%	≤ 50%	-----

A partir dos resultados obtidos, pode-se dizer que o material estudado cumpre satisfatoriamente a especificação para o uso proposto.

9.5 Caracterização física do cimento asfáltico

Os resultados da caracterização física do ligante asfáltico foram fornecidos pelo laboratório de asfaltos da Companhia Brasileira de Asfalto da Amazônia – CBAA. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Caracterização física do cimento asfáltico CAP 50 – 70.

Características	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	ASTM D 5	50 a 70	56	0,1 mm
Ponto de amolecimento	ASTM D 36	≥ 46	49,2	°C
Viscosidade Brookfield 135 GC-SP 21 20RPM	ASTM D 4402	≥ 274	325	cp
Viscosidade Brookfield 150 GC-SP 21	ASTM D 4402	≥ 112	163	cp
Viscosidade Brookfield 177 GC-SP 21	ASTM D 4402	57 a 285	63	cp
RTFOT penetração retida	ASTM D 5	≥ 55	57	%

RTFOT aumento ponto de amolecimento	ASTM D 36	≤ 8	4,1	°C
RTFOT - Ductilidade a 25°C	ASTM D 113	≥ 20	> 150	cm
RTFOT Variação em % massa	ASTM D 2872	Entre -0,5 a 0,5	-0,054	%
Ductilidade a 25°C	ASTM D 113	≥ 60	> 150	cm
Solubilidade a tricloroetileno	ASTM D 2042	$\geq 99,5$	99,9	% massa
Ponto de fulgor	ASTM D 92	≥ 235	368	°C
Índice de suscetibilidade térmica	ASTM D 018	Entre - 1,5 a 0,7	-1,1	-----
Densidade relativa a 20/4 GC	ASTM D 70	-----	1,003	-----

Fonte: Companhia Brasileira de Asfalto da Amazônia – CBAA (2018).

Dos resultados da caracterização do cimento asfáltico é importante destacar a consistência do asfalto, avaliada na empresa CBAA por meio do ensaio de penetração, resultado que permite comprovar que o cimento asfáltico corresponde efetivamente ao comercialmente conhecido como CAP 50-70, tendo em vista que sua penetração foi de 56 décimos de milímetro (1/10 mm). Além dos resultados de viscosidade, foi possível obter as temperaturas de mistura e de compactação para a confecção da mistura asfáltica. Do resultado do ensaio que simula o envelhecimento em planta, conhecido como ensaio de película delgada rotacional (*Rolling thin Oven Test* - RTFOT), destaca-se que o cimento asfáltico tem pouca suscetibilidade ao envelhecimento, visto que suas características antes e depois do ensaio apresentaram pouca variação, permanecendo quase constantes. Esse fato é ratificado com o índice de suscetibilidade térmica o qual, para asfaltos convencionais, deve estar em um intervalo de - 1,5 a 0,7. Tem-se que valores deste índice menores que -1,5 caracterizam cimentos asfálticos altamente suscetíveis às mudanças de temperatura, exibindo um comportamento rígido e com tendência a quebrar sob baixas temperaturas.

9.6 Caracterização da areia

Conforme resultados obtidos na caracterização da areia, o módulo de finura da areia foi de 1,92 o qual não atende a zona ótima.

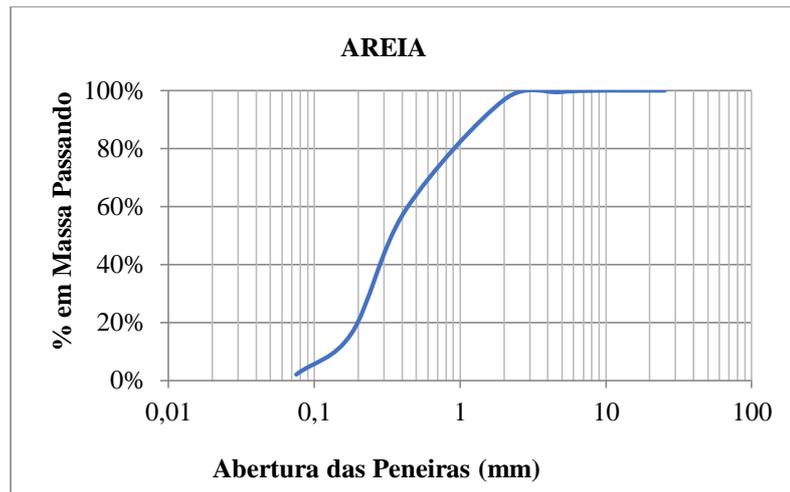


Figura 19 – Curva granulométrica da areia

A massa específica real obtida foi de 2600 kg/m^3 e massa aparente de 1550 kg/m^3 , esses valores ficaram dentro das faixas para um agregado normal. A mesma demonstrou um baixo teor de impurezas orgânicas presentes no material ensaiado, atendendo assim, as prescrições da norma NBR NM 49 (ABNT, 2001).

9.7 Análise termogravimétrica (TG) da fibra vegetal de juta

Houve perda de massa na curva TG entre o intervalo aproximado de 225 e $300 \text{ }^\circ\text{C}$ isto podemos atribuir à degradação da hemicelulose na fibra em análise. Nota-se um evento entre 350 e $400 \text{ }^\circ\text{C}$ que provavelmente esteja relacionado à degradação do verniz utilizado para o tratamento da fibra de juta. As temperaturas atribuídas ao ensaio são necessárias para provar que o material pode ser inserido em uma mistura asfáltica, onde a temperatura para compactação ao solo pode atingir a $144 \text{ }^\circ\text{C}$, não efetuando perdas de hemicelulose e tão pouco apresentar picos de decomposição de lignina.

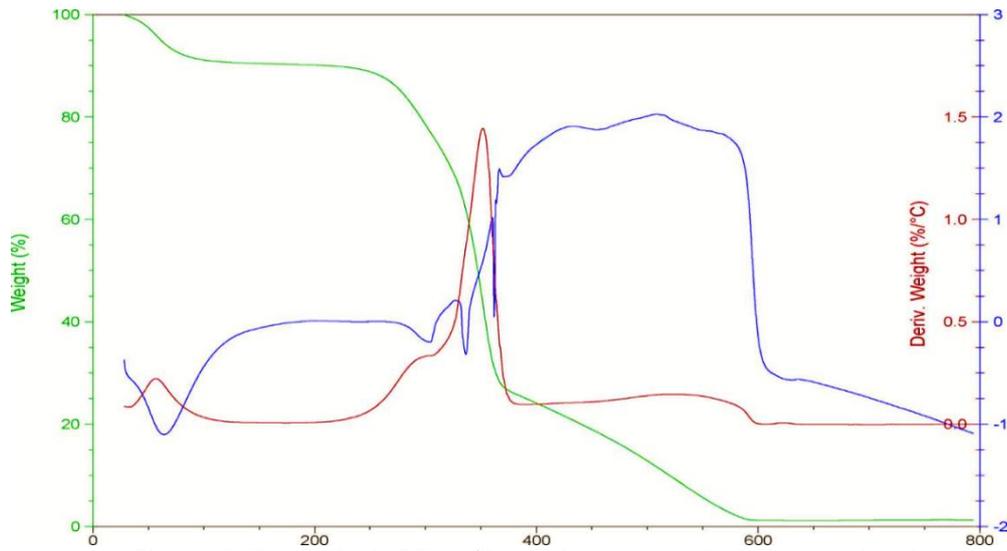


Figura 20: Resultado de TG da fibra de juta processada de forma apicoada

9.8 Avaliação do teor ótimo de cimento asfáltico

A avaliação do teor ótimo de cimento asfáltico foi realizada por meio do método de dosagem Marshall. Os ensaios foram realizados com um teor de asfalto de 5 % em relação à massa total da amostra. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

9.9 Método de dosagem marshall

Uma vez determinado o teor de asfalto (4,5 %) em relação à massa total da mistura, foi preparada uma quantidade de mistura CBUQ suficiente para elaborar cinco corpos de prova Marshall e duas misturas em estado solto para avaliar a densidade máxima medida. Com os resultados dos corpos de prova, foi avaliado o teor de vazios e as características de resistência e deformabilidade (Estabilidade e Fluência). Nos corpos de prova preparados, inicialmente foi realizado o ensaio de densidade Bulk, cujos resultados são exibidos na Tabela 11.

Tabela 11 - Ensaio de Densidade Bulk - corpos de prova Marshall.

ENSAIO		1	2	3	4	5	MÉDIA
ALTURA	(mm)	58,33	56,32	59,22	58,51	59,03	58,29
MASSA NO AR	(g)	1102,6	1037,7	1133,4	1110,2	1103,6	1097,50
MASSA NA ÁGUA	(g)	644,8	605,9	663,6	643,1	644,8	640,44
MASSA SSS	(g)	1103,1	1038,3	1133,9	1110,7	1104,6	1098,12
DENSIDADE BULK	(g/cm³)	2,406	2,400	2,410	2,374	2,400	2,404

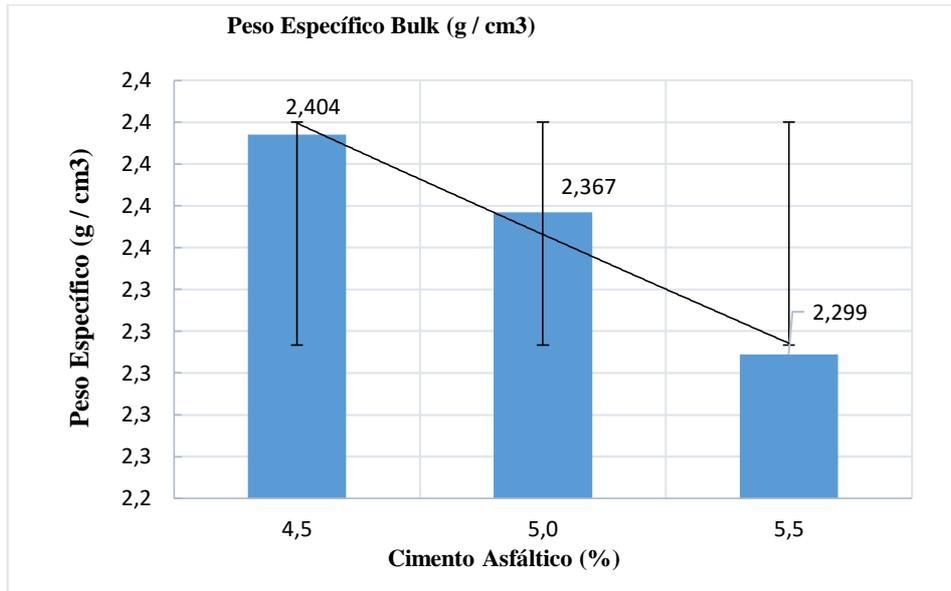


Figura 21: Peso específico Bulk em função do cimento asfáltico



(a)



(b)



(c)



(d)



Figura 22 – Etapas para ensaio Marshall no laboratório de pavimentação - UFAM, sendo (a) dosagem ótima para o ensaio; (b) aquecimento do material; (c) prensagem Marshall; (d) Corpos de provas de ensaio Marshall; (e) desforma de corpo de prova de ensaio Marshall; (f) medida de corpo de prova de ensaio Marshall.

Com os resultados obtidos, foi realizado o cálculo da densidade Bulk excluindo o efeito do corpo de prova 4, pois este resultado se encontrava estatisticamente fora dos limites do intervalo da média mais ou menos uma vez o desvio padrão. O valor da densidade Bulk é altamente influenciado pela relação entre o teor de asfalto e agregado e, com os incrementos do teor de asfalto, os valores de densidade aumentam até um ponto máximo em que a curva começa a decrescer.

Com a mistura asfáltica em estado solto, foi realizado o ensaio de densidade máxima medida, que, em analogia a solos, corresponde ao ensaio de gravidade específica. As mudanças no procedimento do ensaio são feitas em função das propriedades da mistura asfáltica, mas a concepção do ensaio tem o mesmo princípio físico.

Tabela 12 - Resultados do ensaio densidade máxima medida.

ENSAIO	1	2	MÉDIA
MASSA DA AMOSTRA NO AR (g)	2107,5	2011,1	
MASS DA AMOSTRA + ÁGUA + RECIPIENTE (g)	8287,5	8227,5	
TEMPERATURA (°C)	24	24,5	
MASSA DO RECIPIENTE CHEIO DE ÁGUA (g)	7012,6	7012,6	
DENSIDADE MÁXIMA MEDIDA Gmm (g/cm³)	2,531	2,526	2,529

Com os corpos de prova Marshall, foram executados os ensaios de estabilidade e fluência.

Tabela 13 - Resultados do ensaio de estabilidade e fluência marshall.

ENSAIO	1	2	3	4	5	MÉDIA
FATOR DE CORREÇÃO	1,187	1,307	1,159	1,181	1,165	1,1458
ESTABILIDADE CORRIGIDA (N)	10339	9345	10501	8669	8819	9751
FLUXO (mm)	5,41	4,87	4,58	4,23	4,33	4,50
RELAÇÃO ESTABILIDADE/FLUXO (N/m)	1911	1919	2293	2049	2037	2166

Uma vez realizados os ensaios de densidade Bulk, densidade máxima medida Rice, estabilidade e fluxo, procedeu-se à análise de vazios, a qual é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados dos corpos de prova Marshall.

Porcentagem de agregados (%)	(Ps)	95%
Porcentagem de cimento asfáltico (%)	(Pb)	5%
Densidade Bulk (Gmb)	(g/cm ³)	2,404
Densidade Máxima medida Rice (Gmm)	(g/cm ³)	2,529
Volume de vazios	(% Vv)	4,93%
Relação Betume/Vazios	(RBV)	82,0 %
Massa específica efetiva	(Gse)	2,749
Porcentagem asfalto absorvido	(Pba)	1,02%
Teor de asfalto efetivo	(Pbe)	4,03%
Vazios do Agregado Mineral	(% VAM)	14,59%
Relação filer/ligante efetivo	(RP)	2,23

Dos resultados obtidos, há quatro características que são fundamentais para determinar o teor ótimo de ligante asfáltico. Na Tabela 15, são apresentados os requisitos mínimos que uma mistura asfáltica deve atingir. O volume de vazios exigido para a camada de rolamento encontra-se entre 3,0 e 5,0 %, e nos corpos de prova analisados foi obtido um valor de 4,93 %, atingindo a especificação.

O controle do volume de vazios é de vital importância para o comportamento da mistura asfáltica, dado que um teor de vazios muito alto pode gerar envelhecimento precoce da mistura. Os vazios facilitam o ingresso do ar, água e raios ultravioletas na mistura, que podem deteriorar o ligante asfáltico, modificando suas características. Por outro lado, um teor muito baixo de vazios pode gerar exsudação do asfalto, gerando problemas de segurança devido à película de asfalto que aparece no topo da camada.

O valor da relação betume/vazios fixa a proporção de betume dentro dos vazios deixados pelos agregados. O intervalo de valores estabelecido pela norma é de 75 a 82 % e o valor obtido de 82 % atinge o máximo exigido pela norma. Essa relação encontra-se diretamente relacionada ao comportamento da mistura para as relações de vazios alta e baixa. Os vazios no agregado mineral (VAM) estão diretamente relacionados com a acomodação das partículas, tendo um comportamento decrescente à medida que aumenta o teor de asfalto. O valor atingido foi de 15 %, estando de acordo com a especificação.

A estabilidade Marshall é definida como a carga máxima a qual o corpo de prova resiste antes da ruptura, no ensaio padronizado pela norma DNER ME-043/95. O valor mínimo

requerido é de 5000 N, sendo que os corpos de prova avaliados apresentaram um valor de 9751 N.

Tabela 15 - Especificação DNIT 031/2006.

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento
Porcentagem de vazios %	DNER - ME 043	3 a 5
Relação betume / vazios	DNER - ME 043	75 – 82
Estabilidade, mínima (N) (75 golpes)	DNER - ME 043	5000
Vazios de agregados mineral % VAM	DNER - ME 043	16%

Fonte: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (2019).

De acordo com os resultados obtidos nas Tabelas 13 e 14, tem-se que a mistura asfáltica composta por 5 % de asfalto e 95 % de agregados se encontra dentro dos requisitos estabelecidos na especificação DNIT 031/2006.

9.10 Ensaio de microscopia da geogrelha

Na observação dos fios poliméricos, conforme mostrado na Figura 11 (a) e (b), bem como a observação das tramas e junções, constatou-se que os fios possuem um diâmetro de 1mm, por comparação com o traço do papel milimetrado, o fio tem aparência transparente amarelada, não foi encontrado nenhum defeito nas tramas que pudesse prejudicar o desempenho da geogrelha. A cobertura que envolve a trama de fios é da cor marrom, utilizada para proteger a trama contra os raios UV, mantendo o conjunto de fios interligados uns aos outros, e que apresentou algumas fissuras, mas é considerado normal, tendo em vista ser um material flexível, sujeito a esforços de tração.

O material analisado apresentou boas condições de manufatura e conservação, estando apto para ser submetido a ensaios de arrancamento e lançado em campo.

9.11 Ensaio de umidade induzida

Este método estabelece a preparação de corpos de prova e medições de alterações na Resistência a Tração por Compressão Diametral, resultantes dos efeitos de saturação e condicionamento acelerado à água de misturas asfálticas.

No gráfico abaixo, são apresentados os volumes de vazios das misturas estudadas para este ensaio, constatando-se que estes resultados estão dentro dos valores limites segundo a norma técnica NBR 15617 (ABNT, 2015).

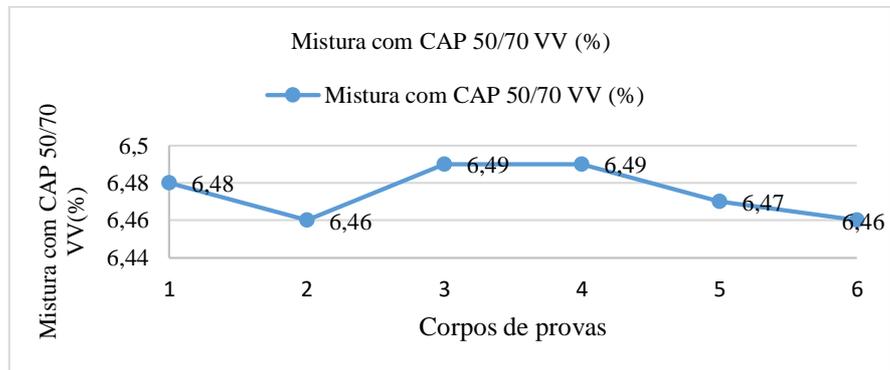


Figura 23 - Volume de vazios dos corpos de prova de misturas asfálticas confeccionadas para o ensaio de umidade induzida

9.12 Ensaio da resistência à tração por compressão diametral

Após a realização do ensaio anterior registrou-se, para a carga máxima de tensão, os resultados presentes na Tabela 13, a mesma apresenta os resultados dos ensaios de resistencia a tração por compressao diametral, a temperatura de 25 °C, para misturas com CAP 50/70, empregando-se 75 golpes em cada face do corpo de prova.

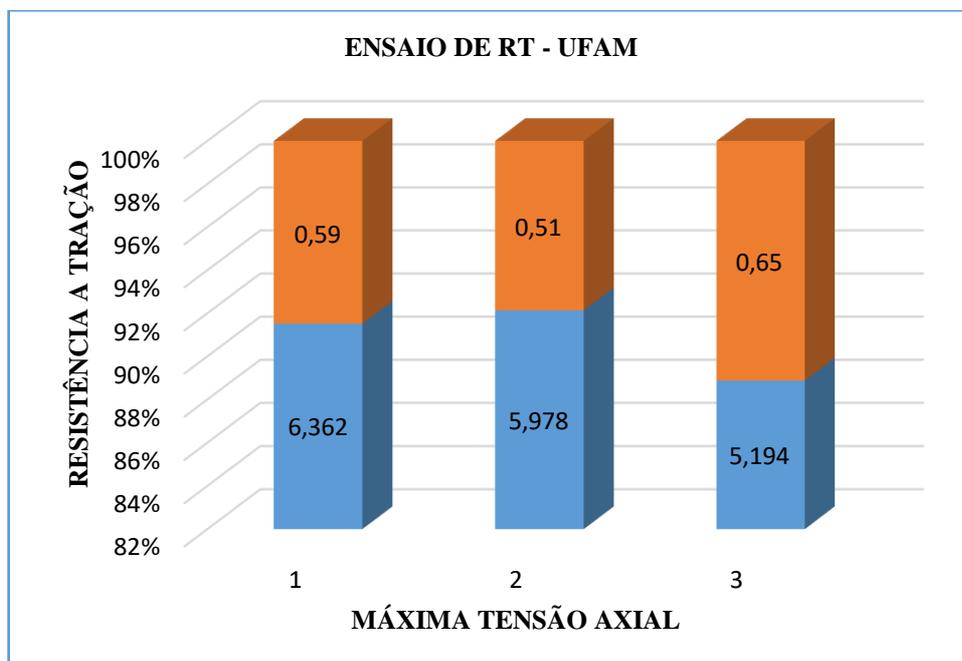


Figura 24 - Resultados das resistências a tração por compressão diametral de corpos de prova de misturas asfálticas moldadas com CAP 50/70.

Como resultado do ensaio foi possível verificar que a média da resistência a tração por compressão diametral para a mistura com ligante asfáltico convencional CAP 50/70 foi 0,58 MPa e conforme norma DNIT 136/2010 – ME os resultados aqui encontrados correspondem com valores que podem ser usados em mistura para pavimentação asfáltica.

9.13 Ensaio cântabro

O ensaio Cântabro fornece um bom indicador indireto das características de coesão ou de desgaste de uma mistura asfáltica. Na Tabela 16, apresentam-se os resultados deste ensaio em laboratório, onde se pode observar que, os valores são inferiores ao valor limite estipulado na norma ME 383 (DNER,1999), podendo desta forma ser usado em mistura asfáltica.

Tabela 16 - Resultados do Ensaio Cântabro para a mistura em estudo.

CP	TIPO DE LIGANTE	P01(gr) ANTES	P02(gr) DEPOIS	DESGASTE CÂNTABRO (%)	MEDIDA DO DESGASTE CÂNTABRO (%)
1	CAP 50/70	1.191,72	1.119,45	6,09	5,87
2		1.194,5	1.126,14	5,65	
3		1.189,7	1.119,62	5,89	

9.14 Ensaio de arrancamento de geogrelha de fibra de juta

Nesta fase da pesquisa realizaram-se ensaios de arrancamento de geogrelha, num total de nove ensaios, com as características apresentadas na Tabela 17, onde se variou a velocidade do ensaio nos parâmetros de 1, 2 e 4 mm/min, cujo resultado está apresentado no gráfico da Figura nº 23.

Estudos do efeito da velocidade na força de arrancamento foram realizados por LOPES e LADEIRA (1996), o qual observaram um aumento de 18 % na força de arrancamento, quando a velocidade passou de 5,4 mm/min para 22,0 mm/min, também realizaram ensaios de arrancamento com variação de velocidade, com geogrelha de polietileno de alta densidade inseridas em uma amostras de solo de areia.

KAKUDA (2005) também realizou ensaios de arrancamento com variação de velocidade, com geogrelhas do tipo FORTRAC (55/30-20) inseridas em um solo laterítico da Universidade de São Carlos, estado de São Paulo, chegando a resultados de um acréscimo da força de arrancamento superior a 10 %, quando a velocidade passou de 8 mm/min para 100 mm/min.

É importante lembrar que a norma ASTM-D 6706-01 recomenda uma velocidade de 1,0 mm/min para ensaios de arrancamento, padronizando, dessa forma, este fator variável da velocidade de arrancamento.

Constatou-se nesta pesquisa que ao aumentar a velocidade aumenta a força de arrancamento como resposta do ensaio, o que condiz com os resultados da literatura que trata do assunto.

Comparando-se o resultado obtido por FARRAG *at al.* (1993), com o resultado obtido nesta pesquisa, apresentado no gráfico 06, observamos a redução da força máxima de arrancamento, quando se aumenta a velocidade de arrancamento, tendendo a uma estabilização do deslocamento máximo da fibra no molde de ensaio até seu rompimento.

A seguir são demonstrados os resultados dos ensaios realizados, de nº 01 a 09, com a variação de velocidade nos parâmetros de 1, 2 e 4 mm/min, conforme a Tabela 17 e o gráfico da Figura 25.

Tabela 17 – Características do ensaio de variação de velocidade, realizado três vezes para verificar este efeito nos resultados obtidos.

Ensaio	Sobrecarga (kPa)	Velocidade de ensaio (mm/min)	Tamanho da Amostra (cm)	Força máxima de arrancamento (kN)	Deslocamento máximo (mm)
01	70	1	30x25	85,59	1,299
02	70		30x25	85,29	1,305
03	70		30x25	85,25	1,294
04	70	2	30x25	85,92	1,230
05	70		30x25	85,99	1,219
06	70		30x25	85,97	1,201
07	70	4	30x25	86,75	1,199
08	70		30x25	86,30	1,192
09	70		30x25	86,55	1,186

Fonte: Dados provenientes da pesquisa do autor (2019).

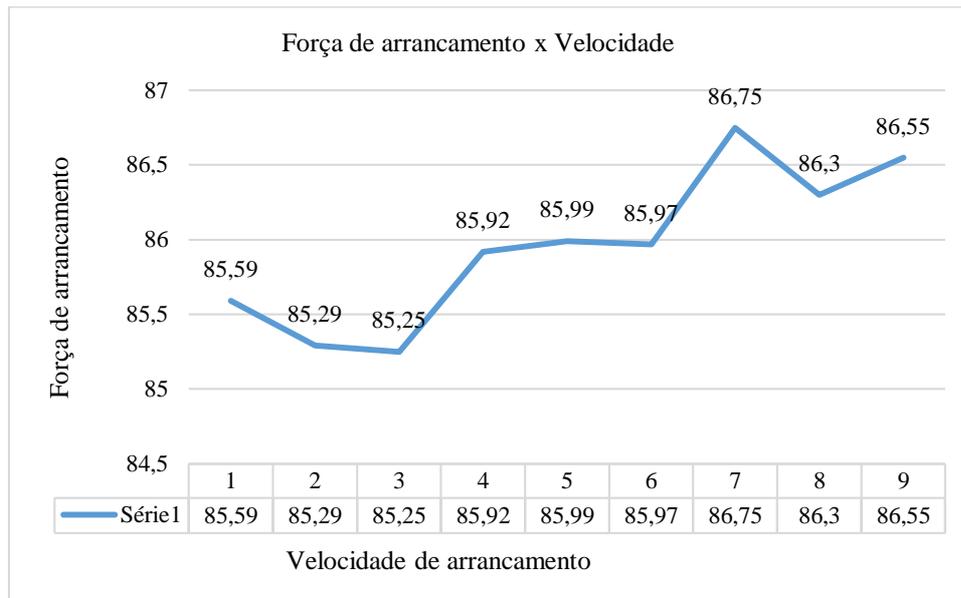


Figura 25 – Representação de Força de arrancamento pela velocidade aplicada.

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Linhas	0,914798	8	0,11435	0,711987	0,678885	3,438101
Colunas	32299,08	1	32299,08	201107	6,85E-19	5,317655
Erro	1,284851	8	0,160606			
Total	32301,28	17				

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

	<i>velocidade de ensaio (mm/min)</i>	<i>deslocamento máx (mm)</i>
Média	2	1,236111111
Variância	0,75	0,002431111
Observações	9	9
Hipótese da diferença de média	0	
gl	8	
Stat t	2,641910346	
P(T<=t) uni-caudal	0,014812683	
t crítico uni-caudal	1,859548038	
P(T<=t) bi-caudal	0,029625366	
t crítico bi-caudal	2,306004135	

Tabela 18 – Resultado valores de Anova
Fonte: Autor (2019)

De acordo com o resultado de Anova da Tabela 18, podemos verificar que há evidência suficiente para rejeitar a afirmação de alterações no erro presente no ensaio investigado, pois o mesmo em dado momento tende a estabilizar a medida que se fizesse mais séries de ensaios.

Constatou-se nesta pesquisa que ao aumentar a velocidade acresce a força de arrancamento como resposta ao ensaio, o que condiz com os resultados da literatura que trata do referido assunto.

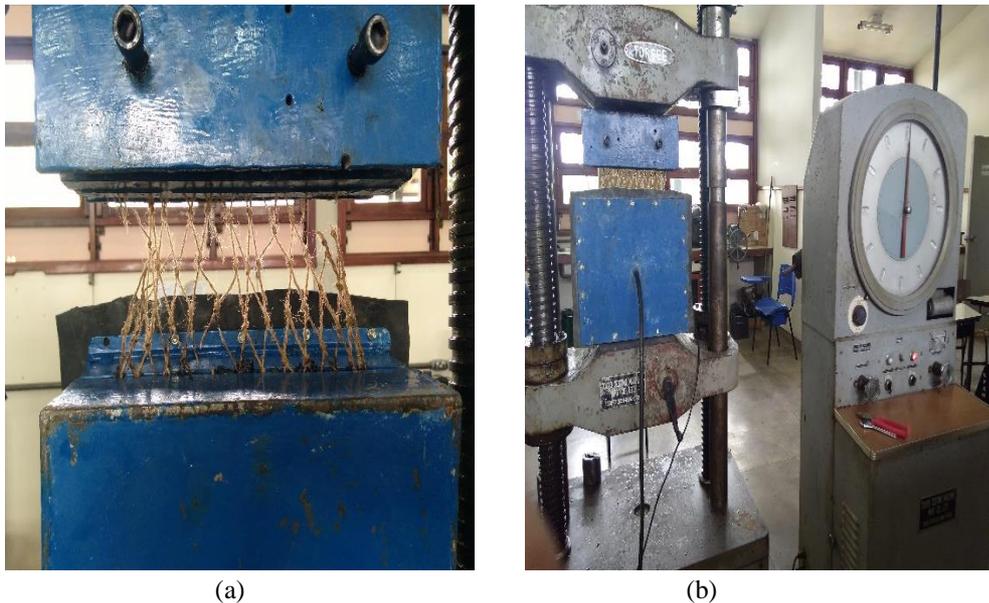


Figura 26 – Ensaio de arrancamento: (a) fixar suportes na prensa hidráulica; (b) Ligar compressor de ar comprimido e célula de carga.

10.0 TRECHO EXPERIMENTAL

Diante as informações apresentadas nesta pesquisa e através do acompanhamento da implantação do trecho experimental com falhas em sua pavimentação, nota-se o expressivo valor dessa rua, pois a mesma possui um tráfego diário elevado por estar próxima a grandes centros atacadistas de alimentação. Para tanto, a rua merece atenção especial devido à sua importância para o trânsito de veículos leves (particulares e passageiros) e extrema importância para a região.

Com isso, nota-se a necessidade de melhorias significativas nas condições de trafegabilidade e conforto ao usuário dessa rua. A utilização de técnicas alternativas à pavimentação, como no caso em estudo, através do emprego de uma solução para o revestimento asfáltico, composto de uma mistura de asfalto com adição de uma geogrelha de

juta, propõem melhorias nas condições de rolamento da pavimentação da rua e, certamente haverá redução dos gastos com manutenção, devendo essa, ser realizada periodicamente, prolongando a vida útil dessa rua e proporcionando melhores condições de trafegabilidade.

10.1 LOCALIZAÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL

O trecho experimental está localizado na Rua Ernane de Paula, no bairro Japiim I, em Manaus-AM, os seguimentos foram construídos sobre uma infraestrutura remanescente do pavimento anterior. Foi inserido nova camada asfáltica com geogrelha de juta totalizando em três áreas para recapear de 1,70m de pista de rolamento nesta referida rua com a localização $3^{\circ}06'38.6''S$ $59^{\circ}58'47.6''W$.



Figura 27 – Pavimentação do trecho experimental; (a) localização do trecho e (b) aplicação de camada asfáltica com geogrelha de juta.

11.0 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

11.1 CONCLUSÕES

Nessa investigação científica, avaliou-se a possibilidade do uso de uma geogrelha manufaturada de fibra de juta em camada asfáltica e para isto foram realizados ensaios e caracterizações desta fibra para que assim conseguíssemos tirar as seguintes conclusões:

- De acordo com a granulometria dos materiais para confecção da mistura asfáltica, nenhum dos três materiais isoladamente é apropriado para a confecção da mistura asfáltica, sendo necessário efetuar uma dosagem para se atender às especificações necessárias em camada asfáltica;

- No resultado do ensaio que simula o envelhecimento em planta, conhecido como ensaio de película delgada rotacional (Rolling thin Oven Test - RTFOT), destaca-se que o cimento asfáltico tem pouca suscetibilidade ao envelhecimento, visto que suas propriedades antes e depois do ensaio apresentaram pouca variação, permanecendo quase constantes. Esse fato é ratificado com o índice de suscetibilidade térmica o qual, para asfaltos convencionais, deve estar em um intervalo de - 1,5 a 0,7. Tem-se que valores deste índice menores que -1,5 caracterizam cimentos asfálticos altamente suscetíveis às mudanças de temperatura, exibindo um comportamento rígido e com tendência a quebrar sob baixas temperaturas.

- A areia apesar de seu módulo de finura ter seu valor encontrado de 1,92 mesmo não atendendo a zona ótima de trabalho a mesma se enquadra na zona utilizável inferior de acordo com a NBR 7211 (2009).

- Quanto ao desempenho de misturas asfálticas reforçadas com geogrelha de fibra de juta, pode-se concluir que a presença da geogrelha usada nesta pesquisa, como tratamento anti-reflexão de trincas, não impediu o fenômeno, mas reduziu a severidade das trincas vistas em conformidade com os corpos de provas feitos em laboratório, passando-se de trincas de tamanho considerável a micro fissuras depois que elas atingiram o reforço, isto comparado ao corpo de prova de referência. Embora, a geogrelha não tenha evitado o fenômeno de reflexão de trincas, contribuiu para que elas demorassem significativamente mais tempo para refletir;

- Com o ensaio de termogravimetria (TG) foi constatado que a geogrelha de fibra de juta tratada pode ser inserida na camada asfáltica mesmo com uma temperatura de lançamento de 144 °C sem que a mesma venha a perder suas propriedades químicas;

- A geogrelha de fibra de juta pode ser usada para reforçar as camadas de misturas asfálticas, desde que seja garantida uma boa aderência entre a camada nova e a camada antiga.

- Ao se aumentar a aderência entre a geogrelha e a mistura asfáltica, pode-se obter um melhor desempenho da fibra com a camada asfáltica, além de se reduzir problemas de deslizamento do recapeamento em relação à camada antiga, especialmente em zonas de frenagem o em decidas;

- Como resultado do ensaio da resistência a tração por compressão diametral para a mistura com ligante asfáltico convencional CAP 50/70 foi 0,58 MPa e conforme norma DNIT 136/2010 – ME, os resultados aqui encontrados correspondem com valores que podem ser usados em mistura para pavimentação asfáltica.

- No ensaio Cântabro apresentam os resultados em laboratório, onde se pode observar que, os valores são inferiores ao valor limite estipulado em norma, podendo desta forma ser usado em mistura asfáltica.

- Nos ensaios de arrancamento realizados em laboratório, podemos verificar que quando ocorre a variação de velocidade, isto influencia na resistência ao arrancamento, reduzindo-a, motivo pelo qual as normas fixam a velocidade padrão a ser utilizada nos ensaios de arrancamento;

11.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Esta pesquisa científica realizou ensaios mecânicos e caracterizações em fibra de juta em camada asfáltica visando ampliar os conhecimentos no assunto de pavimentação, sugere-se que esta pesquisa também poderia ser realizada utilizando-se:

- Avaliar o uso de diferentes tipos de geogrelha mudando abertura, rigidez e composição do material como reforço e capacidade de enfrentar o fenômeno de reflexão de trincas; e

- Estudar o comportamento da mistura reforçada com geogrelha por meio do ensaio de fadiga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDER, **Encontro Nacional de Conservação Rodoviária** – 16º Enacor, Gramada/RS, 2013

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 10318:2013 - **Definição para os termos relativos aos geossintéticos**. Rio de Janeiro, 2013.

_____ – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 27: 2001 - **Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Rio de Janeiro, 2001.

_____ – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 45: 2006 - **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

_____ – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 46: 2003 - **Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003.

_____ – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248: 2003 - **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

_____ – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 49: 2001 - **Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas**. Rio de Janeiro, 2001.

_____ – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15087: 2012 - **Misturas asfálticas — Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro, 2012.

_____ – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15617: 2015 - **Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida**. Rio de Janeiro, 2015.

_____ – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 136: 2010 - **Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, **Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design**, AASHTO, Washington, DC, USA, 2017.

ASPHALT ACADEMY (2008). **Asphalt reinforcement for road construction**, T3 first edition, ASPHALT ACADEMY, Petroria, Africa do Sul, T3 first edition: pp. 23 – 26.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D5581-07a (2013), **Método de Teste Padrão para Resistência ao Fluxo Plástico de Misturas Betuminosas Usando Aparelho Marshall (Amostra de 6 polegadas de Diâmetro)**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

_ D 2041-00. **Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures**. In: Annual Book of ASTM Standards, 2000.

_ D 2726-00. **Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of NonAbsorptive Compacted Bituminous Mixtures**. In: Annual Book of ASTM Standards, 2000.

_ D 5821-95. **Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1995.

_ D 7460-10. **Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

AGOPYAN, V. **Materiais Reforçados com Fibras para a Constru ao Civil nos Países em Desenvolvimento: o uso de Fibras Vegetais**. Tese (Doutorado) — Tese (Livre-Docência) Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, 1991.

AUSTIN, R.A., & GILCHRIST, A.J.T. (1996). **Enhanced performance of asphalt pavements using geocomposites, Geotextiles and Geomembranes**. 14: 175 – 186.

BABURAMANI, P. (1999). **Asphalt fatigue life prediction models – a literature review**. ARRB transport research Ltd, Vermont South, Victoria, Australia, Research report ARR 334, 40 p.

BALBO, J. T. (2006). **Pavimentação Asfáltica**. Oficina de textos, Rio de Janeiro, RJ, 560 p.

BALBO, J.T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BANCO MUNDIAL (2007). **Relatório nº. 36624-BR Volume I: Relatório Principal, Como Revitalizar os Investimentos em Infra – Estrutura no Brasil: Políticas Públicas para uma Melhor Participação do Setor Privado**. Departamento de Finanças, Setor Privado e Infraestrutura Região da América Latina e do Caribe, BRASIL, 5 – 14 p.

BARRAZA, D.Z., CONTRERAS, J.N., FRESNO, D.C., ZAMANILLO, A.V. (2011). **Evaluation of antireflective cracking systems using geosynthetics in the interlayer zone, Geotextiles and Geomembranes**, 29: 130 – 136.

BASTOS, G.A. (2010). **Comportamento mecânico de misturas asfálticas reforçadas com Geogrelhas para pavimentos flexíveis**. Dissertação de mestrado, Publicação CDD:624, Departamento de Engenharia Civil, PUC RJ, Rio de Janeiro, RJ, 247 P.

BERNUCCI, L.B., MOTTA, L.M.G., CERATTI, J.A.P. (2006). **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**, PETROBRAS: ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, pp. 504 p.

BLEDZKI, A.; GASSAN, J. **Composites reinforced with cellulose based fibres**. Progress in polymer science, Elsevier, v. 24, n. 2, p. 221–274, 1999.

BRÍGIDA, A.; CALADO, V.; GONÇALVES, L.; COELHO, M. **Effect of chemical treatments on properties of green coconut fiber**. Carbohydrate Polymers, Elsevier, v. 79, n. 4, p. 832–838, 2010.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. Interscience (Wiley), 1963.

BULHER, A. (2007). **Estudo do efeito de grelha de reforço na restauração de pavimentos**. Tese de Doutorado, Divisão de Engenharia de Infra-estrutura Aeronáutica, ITA, São José dos Campos, SP, 323 p.

BUTTON, J. & LYTTON, R. (2003). **Geosynthetics in Flexible and Rigid pavement overlay systems to reduce reflection cracking**. Information & Technology Exchange center (ITEC), Texas transportation institute, Texas A&M University, Austin, Texas, U.S.A, report 1777-P2, project number 0-1777.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (2011), **pesquisa CNT de rodovias 2011**, 11 – 32 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (2012), **relatório gerencial**. – Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2012.

CORREIA, N.S. & BUENO, B.S. (2011). **Effect of bituminous impregnation on nonwoven geotextiles tensile and permeability properties**, *Geotextiles and Geomembranes*. 29: 92-101.

COUTTS, R.S.P. Banana fibres as reinforcement for building products. **Journal of Materials Science Lettery**, v.9, p1235-6, 1990

DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de transportes.

_DNIT 005/2003-TER: **Defeitos nos pavimento flexíveis e semi-rígidos** - Terminologia

_ DNIT 031/2006: **Pavimentos flexíveis concreto asfáltico** – Especificação de Serviço.

_ DNER-ME 035/98: **Agregados-determinação da abrasão Los Angeles**.

_ DNER – ME 043/95: **Misturas betuminosas a quente** – Ensaio Marshall.

_ DNER-ME 083/98: **Agregados – análise granulométrica.**

_ DNER-ME 086/94: **Agregado – determinação do índice de forma.**

_ DNIT 142/2010: Pavimentação – **Base de solo melhorado com cimento** – Especificação de Serviço.

_ DNER ME 383/99- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Método de Ensaio - Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero:** ensaio cantabro.

CHAND, N.; VERMA, S.; ROHATGI, P. **Tensile, impact and moisture studies of sisal-polyester composites.** Tropical science, 1987.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A.; DEVENTER, J. V. **Geopolymer technology: the current state of the art.** *Journal of Materials Science, Springer*, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2007.

FARRAG, K., ACAR, Y.B., JURAN, I. **Pull-out resistance of geogrid reinforcements.** *Geotextiles and Geomembranes*, n. 12. 1993.

FENGEL, D. **Wegener g. wood chemistry, ultrastructure. Reactions.** New York: Walter de Gruyter & Co, p. 337–338, 1984.

FERROTTI, G., CANESTRARI, F., VIRGILI, A., GRILLI, A. (2011). A strategic laboratory approach for the performance investigation of geogrids in flexible pavements. *Journal of construction and building materials*. 25: 2343-2348.

FRISCHTAK, C.R. (2009). **O investimento em infra-estrutura no Brasil: histórico recente e perspectivas.** *Pesquisa e planejamento econômico*, 38(2): 307-348.

FRITZEN, M.A. (2005). **Avaliação de soluções de reforço de pavimentos asfálticos com simulador de tráfego na rodovia rio Teresópolis**. Dissertação de mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 291 p.

FONSECA, V. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas em compósitos poliéster/sisal quimicamente tratados**. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 1998.

GUPTA, R. (2009). **A study of Geosynthetic reinforced flexible pavements system**. Dissertation Doctor of Philosophy, the University of Texas at Austin, 281 p.

HOSSEINI, H.R.A., DARBAN, A.K., FAKHRI, K. (2009). **The effect of geosynthetic reinforcement on the damage propagation rate of asphalt pavements**, scientia iranica, 16: 26-32.

IPEA, DENATRAN, ANTP (2006). **Impactos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito nas rodovias brasileiras** – Relatório Executivo, IPEA/DENATRAN/ANTP, BRASÍLIA – DF, 80 p.

IPEA; DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO (DENATRAN). **Impactos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito nas rodovias brasileiras**: Relatório Executivo. Brasília, dez. 2014

IPEA; DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO (DENATRAN). **Impactos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito nas rodovias brasileiras**: Relatório Executivo. Brasília, out. 2016

ISAIAS, G. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007.

JONES, F. R. **Handbook of polymer-fibre composites**. [S.l.]: Longman, 1994.

KAKUDA, F.M. **Estudo de ensaios de arrancamento de geogrelha com utilização de um equipamento reduzido**. 2005. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

KHODAI, A., SHAHAB, F., FEREDDOON, M. N. (2009). **Effects of geosynthetics on reduction of reflection cracking in asphalt overlays, Geotextiles and Geomembranes**. 27: 1–8.

KOMATSU, T., KIKUTA, H., TUJI, Y. (1998). **Durability assessment of geogrid-reinforced asphalt concrete, Geotextiles and Geomembranes**, 16: 257 – 271.

LEWIN, M.; GOLDSTEIN, I. S. **Wood structure and composition**. [S.l.]: M. Dekker, 1991.
LADEIRA, M.A.S.A. LOPES, M.L. **Estudo dos fenômenos da interação solo geossintéticos através de ensaios de arranque**. Revista Geotecnia, n. 74. 1995.

MAGALHÃES, J. **Tecnologia de obtenção da madeira**. PENEDO, WR **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, MG, CETEC-Centro Tecnológico de Minas Gerais, p. 55–66, 1980.

MELO FILHO, J. **Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

MENDES, T. **Propriedades de resistência à tração e ao impacto de compósitos poliéster/sisal. um estudo comparativo**. Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN, Natal, RN, 1992.

MONISMITH, C.L. & COETZEE, N.F. (1980). **Reflection cracking: Analyses, laboratory studies, and design considerations**. Asphalt paving Technology, Louisville, Kentucky, U.S.A, 268313.

MONTESTRUQUE, G.E. (2002). **Contribuição para a elaboração de método de projeto de restauração de pavimentos asfálticos utilizando geossintéticos em sistemas anti-reflexão**

de trinca. Teses de Doutorado, Divisão de Engenharia de Infra-estrutura Aeronáutica, ITA, São José dos Campos, SP, 137 p.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. **Natural fibers, biopolymers, and biocomposites.** [S.l.]: CRC Press, 2005.

NEEDLES, H. L. **Textile fibers, dyes, finishes, and processes.** [S.l.]: Standard Publishers Distributors, 2001.

OLIVEIRA, M. H. **Principais matérias-primas utilizadas na indústria têxtil.** BNDES Setorial, n. 5, p. 1–47, 1997.

PEREIRA, A.S. (2002). **Utilização de Geotêxteis em Reforço de Pavimento aplicado em um trecho experimental.** Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 195 p.

PIRES, E. N. et al. **Efeito do tratamento de superfície em fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi.** Florianópolis, SC, 2009.

PHILIPP, P.; D'ALMEIDA, M. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica.** São Paulo, IPT, 1988.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. **Warm-mix asphalt: Best Practices.** Quality Improvement Series 125. Lanham: NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2009.

Rodrigues, R.M. (2003). **Geossintéticos aplicados a pavimentação.** IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, Porto Alegre, RS, 9 -37 p.

ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. et al. **Cell wall chemistry. Handbook of wood chemistry and wood composites,** CRC Press, Boca Raton, p. 35–74, 2005.

ROWELL, R. M.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S. **Characterization and factors effecting fiber properties. Natural Polymers and Agrofibers Bases Composites.** Embrapa Instrumentacao Agropecuaria, P. O. Box 741, Sao Carlos, 13560-970 SP, Brazil, 2000, p. 115–134, 2000.

SANTOS, C. P.; REIS, I.; MOREIRA, J.; BRASILEIRO, L. **Papel: como se fabrica.** Química nova na escola, v. 14, p. 36–39, 2001.

SHUKLA, S.K. (2002). **Geosynthetics and their applications.** Thomas Telford Ltd, London, UK, 414 p.

SJOSTROM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications.** [S.l.]: Elsevier, 1993.

SILVA, R.B., FERREIRA, A.A.E., COUTO, C.R., SEGANTINI, A.A.S. (2003). **Estudo da resistência à compressão do solo – cimento com adição de resíduos de construção por meio de ensaios em corpos-de-prova cilíndrico.** Faculdade de engenharia de Ilha Solteira, Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista UNESP, 5 p.

SPECHT P.; LUCIANO. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus.** Tese (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TEIXEIRA, S.H.C. **Estudo da interação solo-geogrelha em testes de arrancamento e a sua aplicação na análise e dimensionamento de maciços reforçados.** 2003. 218p. Tese de Doutorado (Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos.

TÍMÁR-BALÁZSY, Á.; EASTOP, D. **Chemical principles of textile conservation.** [S.l.]: Routledge, 1998.

TITA, SANDRA P. S.; PAIVA, JANE M. F. DE AND FROLLINI, ELISABETE. **Resistência ao Impacto e Outras Propriedades de Compósitos Lignocelulósicos: Matrizes Termofixas Fenólicas Reforçadas com Fibras de Bagaço de Cana-de-açúcar.** *Polímeros* [online]. 2002, vol.12, n.4, pp.228-239.

VINCENT, J. F. A **unified nomenclature for plant fibres for industrial use**. Applied Composite Materials, Springer, v. 7, n. 5-6, p. 269–271, 2000.

VIRGILI, A., CANESTRARI, F., GRILLI, A., SANTAGATA, F.A. (2009). **Repeated load test on bituminous systems reinforced by geosynthetics, Geotextiles and Geomembranes**. 27: 187 – 195.

WICKERT, F. (2003). **Fatores de influência no comportamento de camadas anti-reflexão de trincas com geossintéticos**. Dissertação de mestrado, Divisão de Engenharia de Infra-estrutura Aeronáutica, ITA, São José dos Campos, SP, 158 p.

YOUNG, R. **Fibers (Vegetable)**. Kirk-Othmer encyclopedia of chemical Technology 4 th. Ed. Volume 10. J. [S.l.]: Wiley & Sons, Inc, 1994.

ZOU, W.L., WANG, Z., ZHANG, H.M. (2007). Field trial for asphalt pavements reinforced with geosynthetics and behavior of glass-fiber grids, **Journal of performance of constructed facilities**, ASCE, 361: 1-12.