

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOÃO PAULO COSTA MENESES

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS DE
DOSAGEM E DESEMPENHO DE CONCRETO ASFÁLTICO
POROSO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE BAGAÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR**

VITÓRIA
2017

JOÃO PAULO COSTA MENESES

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS DE
DOSAGEM E DESEMPENHO DE CONCRETO ASFÁLTICO
POROSO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE BAGAÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Orientadora: Prof.^a Ph.D Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira.

VITÓRIA

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

M543e Meneses, João Paulo Costa, 1988-
Estudo experimental de parâmetros de dosagem e
desempenho de concreto asfáltico poroso com adição de fibras
de bagaço de cana-de-açúcar / João Paulo Costa Meneses. –
2017.
98 f. : il.

Orientador: Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Asfalto – Porosidade. 2. Materiais porosos. 3. Bagaço de
cana. 4. Fibras. 5. Celulose. I. Teixeira, Jamilla Emi Sudo Lutif. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III.
Título.

CDU: 624

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS DE DOSAGEM E
DESEMPENHO DE CONCRETO ASFÁLTICO POROSO COM ADIÇÃO DE
FIBRAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

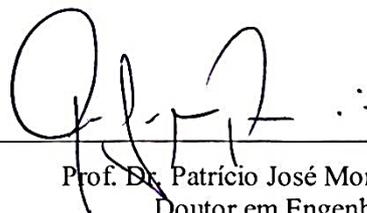
João Paulo Costa Meneses

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

Aprovada no dia **18 de setembro de 2017** por:



Prof.ª Dr.ª Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira
Doutora em Engenharia Civil
Orientadora - UFES



Prof. Dr. Patricio José Moreira Pires
Doutor em Engenharia Civil
Membro Interno - UFES



Prof.ª Dr.ª Kamilla Vasconcelos Savasini
Doutora em Engenharia Civil
Membro Externo - USP

Aos meus queridos irmãos Rafa e Pedro.

A minha noiva Mary, pelo amor, parceria e constante incentivo.

A Rose e Beto, que me deram a vida e a oportunidade de me superar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pela saúde, coragem e persistência nessa jornada de crescimento pessoal e profissional. À minha família, noiva e amigos pelas palavras de carinho, incentivo e paciência nos momentos difíceis.

Dentre os vários contribuintes para a realização deste trabalho, estão os amigos e técnicos dos laboratórios da UFES, LABGEO e LEMAC, em especial a colega Natália Moncioso pelo apoio e motivação durante os ensaios.

Agradeço aos colegas do Grupo de Estudos em Pavimentos (GEP-UFES), pela rede de cooperação e as várias experiências trocadas.

Agradecimento em especial à minha orientadora Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira, que sempre se mostrou muito talentosa em manter seus orientandos motivados e confiantes, mesmo nos momentos de grande desafio e desânimo. Obrigado por ser esse exemplo de profissional e pessoa, sempre muito competente, solícita, disponível, dedicada e humana. Foi uma enorme satisfação e sorte, ser seu orientado.

Agradeço aos professores Patrício Pires e Kamilla Vasconcelos Savasini, pela disponibilidade em integrar a banca avaliadora, e pelos inúmeros conhecimentos trocados. Especial agradecimento ao professor Patrício, pelo suporte nos ensaios no LABGEO. Obrigado por compartilharem suas experiências.

Agradeço a todos os amigos que fiz durante essa jornada, Maxwell, Júlia e Aécio, dentre os vários outros colegas de jornada.

Gratidão aos fornecedores de materiais, Betunel (fibras de celulose), na figura do Eng. Rômulo Constantino, Serrabetume (ligante asfáltico), representada pelo Eng^o Bruno Rocha e Pedreira Rydien (agregados), encarregado Aloisio.

Agradeço ao professor Thiago Aragão da Federal do Rio de Janeiro, pelo importante apoio no desenvolvimento da pesquisa e cooperação para a realização de ensaios na COPPE.

Por fim, ao gerente de unidade Giovani Gujansky do SENAI-VV, pela compreensão e apoio, principalmente quanto à flexibilização dos meus horários de trabalho, essencial para a realização desse trabalho.

A glória é tanto mais tardia quanto mais duradoura há de ser,
porque todo fruto delicioso amadurece lentamente.

Arthur Schopenhauer (1851)

RESUMO

Revestimentos asfálticos porosos, conhecidos como camada porosa de atrito (CPA), são uma técnica bastante difundida internacionalmente, visto suas vantagens sobre pavimentos comuns, principalmente em condições chuvosas, como redução de spray e risco de aquaplanagem, aumento da aderência pneu-pavimento e redução do fenômeno de espelhamento noturno. Em contraponto, um dos problemas da mistura é sua maior susceptibilidade ao escorrimento de ligante, e uma das formas de se minimizar o fenômeno é a utilização de fibras na dosagem. As fibras de bagaço de cana-de-açúcar são uma das opções de fibras, e seu emprego é motivado por questões ambientais, pois as fibras são de origem do resíduo da indústria sucroalcooleira. O Brasil, devido ao seu posicionamento geográfico, apresenta períodos intensamente chuvosos e, dessa forma, o emprego de revestimentos asfálticos porosos se mostra bastante adequado. Todavia, os estudos e aplicações de CPA no país ainda são incipientes, seja por questões de custo e/ou ausência de normas específicas nacionais para dosagem desse tipo de mistura. Deste modo, buscou-se avaliar o comportamento físico e mecânico de CPAs com adição de fibras de celulose (CEL), comumente empregadas para minimizar o escorrimento em CPAs, mas também com fibras de bagaço de cana-de-açúcar (BCA). Devido à ausência de regulamentação nacional, empregou-se para a dosagem a ASTM D7064-13. Além de resistência à abrasão (Los Angeles) e escorrimento de ligante, ensaios mínimos estabelecidos por norma para dosagem de CPA, foram verificados módulo de resiliência (MR), resistência à tração (RT) e permeabilidade, para avaliar o desempenho das misturas. As misturas BCA apresentaram maior valor de escorrimento de ligante, embora o BCA tenha reduzido o escorrimento comparando-se a uma mistura referência (sem fibras). Ainda, menores valores obtidos para relação MR/RT para as misturas BCA, indicaram melhor comportamento de vida de fadiga. Ainda que os resultados de permeabilidade obtidos tenham sido baixos, foi possível concluir que a presença de fibras pode reduzir significativamente o coeficiente de permeabilidade de CPAs.

Palavras-chave: asfalto poroso (AP); camada porosa de atrito (CPA); fibras; celulose; bagaço de cana-de-açúcar (BCA); durabilidade; fadiga; drenabilidade.

ABSTRACT

Porous asphalt (PA) is a widespread paving technic because of the advantages over conventional pavement, especially in rainy conditions, as headlights glare reduction at night, spray and splash reduction and aquaplaning risk reduction and adherence increase. Binder draindown is one of the problems of the mixture, and using stabilizing fibers at mix design is a commonly alternative to reduce the phenomenon. Sugarcane bagasse fibers are an option, and its use is based on environmental issues, by giving a new disposal to sugar-alcohol industry waste. Due to geographic positioning and consequent intense rainy periods, using PA's in Brazil shows to be quite suitable. However, PA use in Brazil still is incipient, either by high costs and/or lack of national specific dosage standards. The aim of this study was to evaluate physical and mechanical behavior of PA with the addition of cellulose fibers (CEL), commonly used to minimize binder draindown, but also with sugarcane bagasse (SB) fibers. Due to lack of Brazilian standardization, the ASTM D7064-13 guideline were used for dosage. Beyond standard required tests (Cantabro abrasion resistance and binder draindown), resilient modulus (RMT), indirect tensile strength (IDT) and permeability tests were performed to evaluate mixtures performance. SB mixtures showed higher draindown values, although was responsible for reducing draindown if compared to mixtures without fibers. Furthermore, the lower RMT/IDT values for the SB mixtures indicated better fatigue life behavior. Although low values for permeability were obtained, due to the adopted granulometric range, it was concluded that in PA's the use of fibers can significantly reduce its permeability coefficient.

Keywords: porous asphalt (PA), permeable friction course (PFC); fibers; cellulose; sugar cane bagasse; durability; fatigue; drainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Precipitação pluviométrica - Ano 2014 - Vitória ES	13
Figura 2 – Redução de acidentes devido à implantação de CPA no Japão.....	14
Figura 3 – Perfil do Pavimento (CPA)	18
Figura 4 – Absorção sonora	19
Figura 5 – Trecho de CPA no Rodoanel-SP.....	20
Figura 6 – TC_CPA – vista superior (esq.) e transversal (dir.)	26
Figura 7 – Estrutura esquemática de asfalto poroso	26
Figura 8 – Desagregação superficial em asfalto poroso	27
Figura 9 – Resultados de Perda por Abrasão e Vv	29
Figura 10 – Escorrimento em SMA a) sem fibras e b) com fibras	31
Figura 11 – Redução de permeabilidade devido ao escorrimento de ligante.....	32
Figura 12 – Permeabilidade x Tempo: a)SBS + Fibra, b) Borracha Pneus e c)SBS sem Fibras.	33
Figura 13 – Resultado de a)MR e b)Afundamento de trilho de roda (HWT).....	35
Figura 14 – Relação entre índice de vazios e coeficiente de permeabilidade.....	37
Figura 15 – Micrografia das fibras do bagaço de cana-de-açúcar.....	44
Figura 16 – Fibra de Celulose em pellet.....	45
Figura 17 – Organograma do programa experimental	47
Figura 18 – Corte do bagaço de cana-de-açúcar	51
Figura 19 – Peneiramento dos filamentos de bagaço	51
Figura 20 – Fibras de BCA (esq.) e CEL (dir.).....	52
Figura 21 – Preparação de amostras MEV: antes e após metalização.....	54
Figura 22 – Fibra de celulose por MEV 45x	55
Figura 23 – MEV 1800x da fibra de celulose.....	55
Figura 24 – MEV 80x BCA região2	56
Figura 25 – MEV 80x BCA região1	57
Figura 26 – Granulometria adotada.....	60
Figura 27 – Processo de dosagem.....	62
Figura 28 – Cesta de arames para ensaio de escorrimento.....	63
Figura 29 – Ensaio de escorrimento de ligante asfáltico	64
Figura 30 – Permeâmetro de parede flexível	66

Figura 31 – Ensaio de compressão diametral	68
Figura 32 – Deformação recuperável instantânea.....	72
Figura 33 – Deformação recuperável total	72
Figura 34 – Percentual de vazios x Teor de ligante	74
Figura 35 – Percentual de desgaste à abrasão x teor de ligante	77
Figura 36 – Percentual de desgaste à abrasão (envelhecido) x teor de ligante	78
Figura 37 – Resultados ANOVA - software Statistica.....	79
Figura 38 – Resultados regressão linear - software Statistica.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dosagem da Camada Porosa de Atrito (DNER-ES386-99).	22
Tabela 2 – Resumo dos requisitos de dosagem (ASTM D7064).....	23
Tabela 3 – Resumo dos requisitos de dosagem (Madrid).	24
Tabela 4 – Resumo dos requisitos de dosagem - Nova Zelândia	24
Tabela 5 – Resultados de resistência à abrasão.....	28
Tabela 6 – Composição granulométrica das misturas utilizadas.....	38
Tabela 7 – Tipos de misturas estudadas por Chen et al. (2013).....	40
Tabela 8 – Resumo dos resultados de Chen et al. (2013).	40
Tabela 9 – Características do Ligante.....	48
Tabela 10 – Resultados de ensaio de cisalhamento em ligante virgem conforme ASTM D7175.....	48
Tabela 11 – Resumo da caracterização dos agregados utilizados	49
Tabela 12 – Resumo da caracterização das fibras utilizados	58
Tabela 13 – Faixa granulométrica utilizada.....	59
Tabela 14 – Volume de vazios médio x teor de ligante	75
Tabela 15 – Percentual de escorrimento de ligante asfáltico	75
Tabela 16 – Resumo dos resultados dos ensaios de dosagem	81
Tabela 17 – MR e RT	82
Tabela 18 – Valores referência para MR/RT	83
Tabela 19 – Referências de coeficiente de permeabilidade	84

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

BCA – Bagaço de Cana-de-Açúcar

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CEL – Celulose

CP – Corpo de Prova

CPA – Camada Porosa de Atrito

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (atual DNIT)

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MR – Módulo de Resiliência

PG – Performance Grade

RT – Resistência à Tração

SBS – Estireno-Butadieno-Estireno

SMA – Matriz Asfáltica Pétreá (Stone Matrix Asphalt)

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

V_v – Volume de Vazios

V_i – Volume de Vazios Interconectados

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo geral	15
1.1.2 Objetivos específicos	15
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 CAMADA POROSA DE ATRITO	17
2.1.1 Características gerais	17
2.1.2 Projeto de misturas	21
2.1.3 Desempenho de Misturas Porosas	25
2.1.3.1 Desagregação.....	25
2.1.3.2 Escorrimento.....	30
2.1.3.3 Deformação Permanente	33
2.1.3.4 Permeabilidade	35
2.1.3.5 Utilização de fibras.....	38
2.2 FIBRAS NATURAIS	43
2.2.1 Fibras de Cana-de-Açúcar	43
2.2.2 Fibras de Celulose	44
3. MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1 MATERIAIS E MATRIZ EXPERIMENTAL.....	46
3.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	47
3.1.2 Agregado miúdo e graúdo	48
3.1.3 Fibras	50
3.1.3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	53
3.1.3.2 Massa Específica.....	57

3.2	DOSAGEM.....	58
3.3	ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS.....	62
3.3.1	Ensaio de escorrimento de ligante betuminoso	62
3.3.2	Desgaste Cântabro	64
3.3.3	Permeabilidade	65
3.3.3.1	Vazios interconectados	67
3.3.4	Resistência à tração – compressão diametral	68
3.3.5	Módulo de resiliência – compressão diametral	69
4.	RESULTADOS	73
4.1	DOSAGEM.....	73
4.1.1	Índice de vazios	73
4.1.2	Ensaio de escorrimento de ligante betuminoso	75
4.1.3	Desgaste Cântabro	77
4.1.4	Teor ótimo de CAP	81
4.2	ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS.....	82
4.2.1	Resistência à tração e Módulo de resiliência.....	82
4.2.2	Ensaio de Permeabilidade	84
4.2.2.1	Vazios interconectados	87
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS	88
	REFERÊNCIAS.....	90

1. INTRODUÇÃO

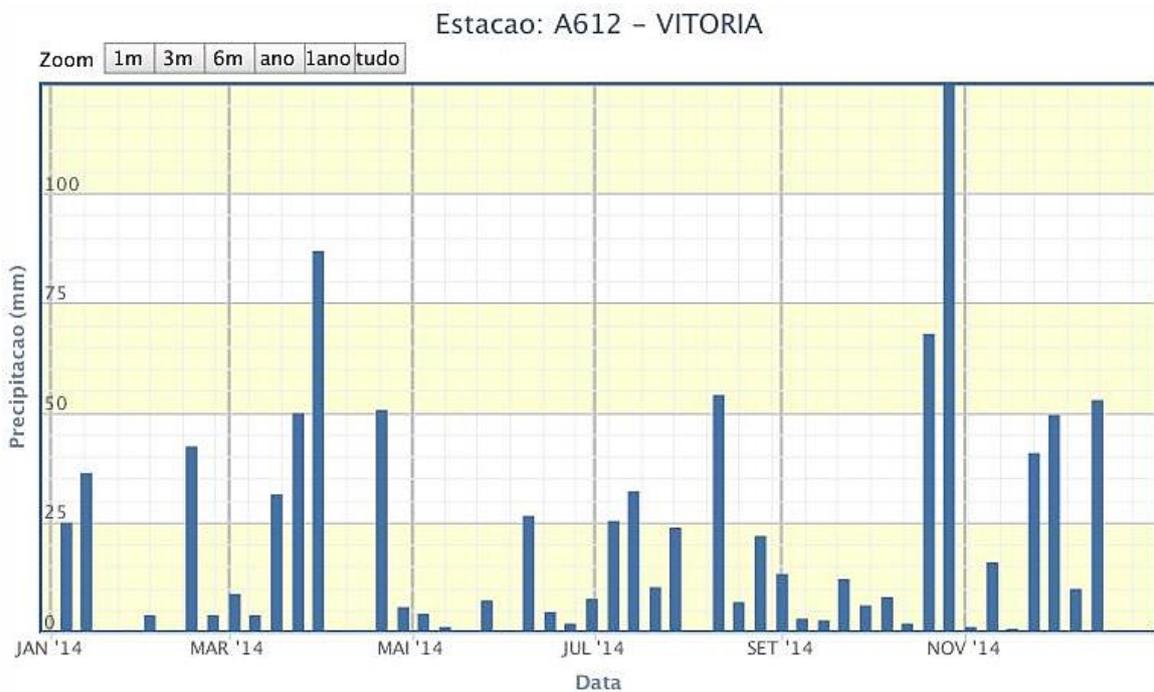
As rodovias brasileiras são os principais caminhos para o transporte de mercadorias e pessoas no país. Apesar da sua importância econômica, apresentam riscos aos usuários, devido ao excesso de fluxo de veículos nas vias, além de problemas de manutenção e infraestrutura dos pavimentos. Como resultado, o Brasil apresenta índices altíssimos de acidentes rodoviários, com consequente elevado custo com os acidentes – públicos e privados. Em 2014 foram registrados 168.593 acidentes, com 100.396 feridos e 8.277 mortos, apenas em rodovias federais (DPRF, 2015).

Segundo o Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas (IPEA, 2015), para o mesmo ano de 2014, o custo total com acidentes rodoviários, em todas as rodovias do Brasil, foi estimado em R\$ 40 milhões. Vale salientar, que os custos gerados por acidentes rodoviários são proporcionais à severidade dos acidentes (ELVIK e GREIBE, 2005), ou seja, tão importante quanto reduzir a quantidade de acidentes, é buscar reduzir a gravidade dos acidentes.

Um fator que pode justificar a grande incidência de acidentes rodoviários é o estado de conservação da malha rodoviária brasileira. Segundo a Pesquisa de Rodovias da Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2015), do total de 1.720.607 Km de rodovias, dos quais apenas 213.299 Km (12,4%) são pavimentados, 40% das rodovias federais apresentam classificação de Regular a Péssimo, quando avaliada a estrutura do pavimento. Já nas rodovias estaduais, o percentual sobe para 65,8% de vias com classificação Regular a Péssimo.

Um fator agravante para os acidentes rodoviários é o clima brasileiro. Por ser predominantemente Equatorial e Tropical, o clima é caracterizado por ser chuvoso e com frequentes precipitações torrenciais. A Figura 1 ilustra as precipitações pluviométricas em Vitória - ES, para ano de 2014, quando foram registrados eventos de até 240mm. A chuva influencia negativamente o ambiente rodoviário, com mais intensidade que neblina ou neve, sob o aspecto de segurança viária. Sob condição chuvosa há elevação do número de acidentes rodoviários devido a formação de espelhamento d'água noturno, formação de spray – névoa d'água levantada pelos pneus, que reduz a visibilidade –, redução da aderência e risco de aquaplanagem (EDWARDS, 2002).

Figura 1 – Precipitação pluviométrica - Ano 2014 - Vitória ES

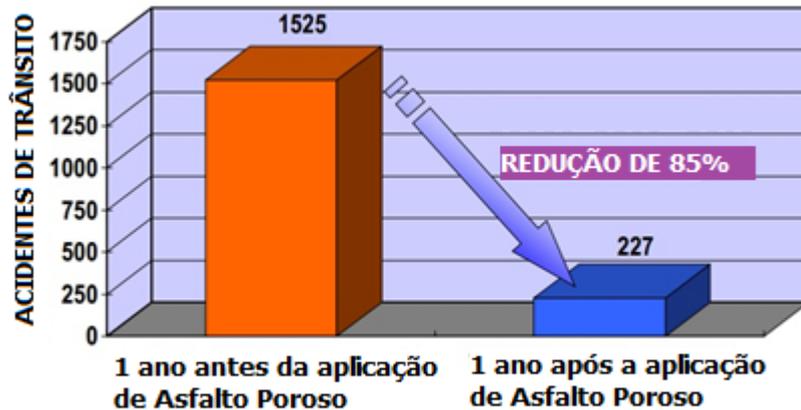


Fonte: INMET (2016).

Uma alternativa para minimizar os efeitos das chuvas sob a camada de pavimento é a utilização de uma camada asfáltica superficial porosa, conhecida como Camada Porosa de Atrito (CPA), conhecida na literatura internacional como PFC (*Permeable Friction Course*). O CPA possui capacidade drenante superficial, reduzindo a formação de spray e reduzindo riscos de hidroplanagem e derrapagem de veículos. Dessa forma, tem-se como resultado a redução dos riscos de rodagem em condições chuvosas.

Um estudo feito no Japão nos anos 90 mostrou como o uso de CPA contribuiu para a redução de acidentes. Em decorrência da implantação de pavimentos porosos em toda a malha rodoviária do país, houve uma expressiva redução de 85% no número de acidentes rodoviários como mostra a Figura 2 (ITARDA, 2000).

Figura 2 – Redução de acidentes devido à implantação de CPA no Japão



Fonte: ITARDA (2000), adaptado pelo autor.

No Brasil, esta tecnologia construtiva já foi empregada em caráter experimental na Rodovia dos Bandeirantes (SP 348), rodovia que liga a capital à Campinas, no Estado de São Paulo, em caráter de recapeamento da via (PORTO, 1999). No entanto, muitos aspectos de dosagem de misturas asfálticas porosas precisam ainda ser investigados para que o uso de CPA se torne eficaz. Ressalta-se a inexistência de uma norma brasileira de dosagens de misturas asfálticas porosas, pois a norma disponível (DNER-ES 386, 1999) limita-se apenas ao controle da execução de obras de CPA, apontando critérios para execução e controle de qualidade de materiais, aceitação, rejeição e medição dos serviços.

Outra problemática que este trabalho visa abordar é relacionada a geração de resíduos industriais no estado do Espírito Santo. Tem-se no estado uma grande produção de cana-de-açúcar. Na safra 2014/15, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2015), a produção de etanol (anidro e hidratado) e açúcar foram, respectivamente, 161.799,28 mil litros e 106,08 mil toneladas, para o estado do Espírito Santo.

Como refugo do processo de beneficiamento da cana-de-açúcar, há a geração do bagaço da cana-de-açúcar (BCA), que é um produto com natureza fibrosa. Para cada tonelada de cana processada, gera-se cerca de 270 quilogramas de bagaço (LEAL, 2013). Atualmente, o bagaço de cana é queimado em caldeiras para a produção de energia elétrica, na própria usina. A geração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro tem importante papel, visto que a energia excedente acaba sendo

revendida à rede pública de energia elétrica (JUNIOR; MIRANDA, 2013). Como resultado da queima, há a geração de calor, gases e cinzas.

As cinzas têm potencial de serem utilizadas como pozolana, devido ao alto teor de sílica, e incorporadas ao processo de produção de cimentos (CORDEIRO *et al.*, 2009). Entretanto, os gases gerados pela queima, embora alguns autores defendam que o balanço de CO₂ do ciclo de beneficiamento da cana seja nulo, contém significativas concentrações de poluentes, como os óxidos de nitrogênio (NO_x) e monóxido de carbono (CO), e emissão de material particulado na atmosfera (CONAMA, 2010). Desse modo, incorporar resíduos de beneficiamento de cana-de-açúcar na composição de misturas asfálticas é um modo de se destinar, de maneira nobre, o refugo do processo produtivo de etanol e açúcar.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

A presente pesquisa tem como principal objetivo realizar um estudo de dosagem de misturas de CPA contendo fibras de bagaço de cana-de-açúcar como adição e avaliar seu desempenho mecânico a curto e longo prazo com base em ensaios mecânicos comumente empregados.

1.1.2 Objetivos específicos

Para cumprir o objetivo geral desse trabalho, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Realizar a dosagem de misturas asfálticas porosas com adição de fibras de celulose (mistura referência) e de BCA.
- Avaliar a resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, e abrasão Los Angeles das misturas asfálticas estudadas (referência e BCA) a curto prazo (após mistura e compactação) e longo prazo (após simulação de envelhecimento);
- Avaliar a permeabilidade de misturas asfálticas porosas a curto (após mistura e compactação) e longo prazo.

- Avaliar se os critérios de dosagem exigidos pela norma ASTM D7064-13 são suficientes e/ou adequados para determinação de composições eficientes de CPAs com base nos resultados obtidos pelas misturas estudadas.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho organiza-se pela seguinte divisão:

O primeiro capítulo dispõe de introdução ao tema, apresentando a relevância da pesquisa e seus objetivos.

O segundo capítulo apresenta uma revisão de literatura nacional e internacional, acerca de camada porosa de atrito, abordando conceitos básicos, projetos de misturas utilizados no Brasil e no mundo, e os fatores que influenciam no desempenho de misturas porosas. Além disso, possui uma revisão de literatura sobre fibras de cana-de-açúcar e celulose. O objetivo desse capítulo é a abordagem de tópicos importantes para entendimento de conceitos desenvolvidos na pesquisa, além de apresentar importantes trabalhos de autores com expertise em CPA.

O terceiro capítulo apresenta os materiais utilizados, bem como seus métodos de caracterização e respectivos resultados de caracterização. Ademais, apresenta os métodos adotados para dosagem e análise de desempenho das misturas.

O quarto capítulo apresenta os resultados e as respectivas discussões dos mesmos, e por fim, é seguido do quinto capítulo, que contempla as conclusões do trabalho, bem como as sugestões de pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CAMADA POROSA DE ATRITO

2.1.1 Características gerais

Segundo o DNIT (DNER-ES 386, 1999), o material a ser empregado na Camada Porosa de Atrito (CPA), cuja nomenclatura não está em consonância com a literatura internacional que nomeia o material atualmente como *Porous Asphalt* (PA), é definido como:

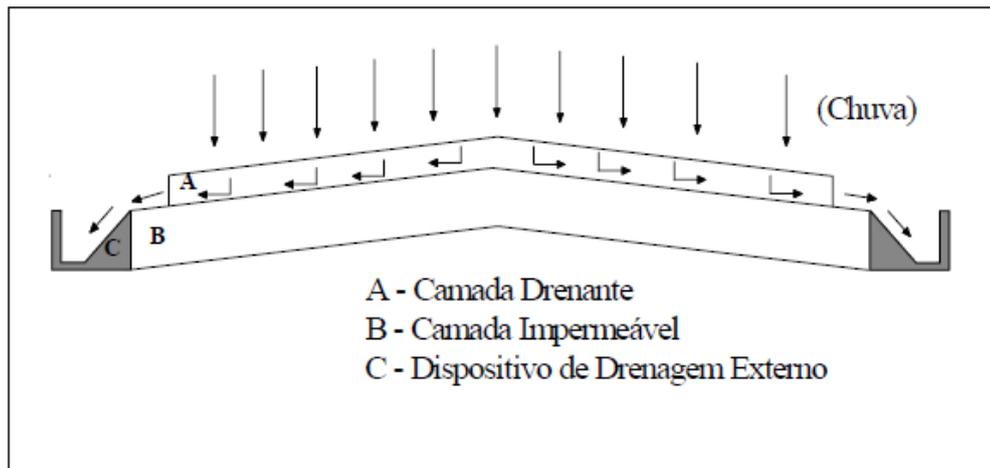
(...) mistura executada em usina apropriada, com características específicas, constituída de agregado, material de enchimento (filer) e cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero do tipo SBS (estireno-butadieno-estireno), espalhada e comprimida a quente (DNER-ES, 1999, pp.2).

A CPA é um tipo específico de mistura asfáltica caracterizado pela sua função drenante. A mistura, diferentemente da convencional, apresenta um vazio granulométrico (GAP), ou seja, existe uma faixa granulométrica de agregado ausente, além disso, a mistura apresenta baixa quantidade de partículas de tamanhos intermediários e de material de enchimento. Como resultado, o revestimento apresenta percentual de vazios, em média, superiores a 20%.

A presença de vazios interconectados confere a capacidade drenante no interior da CPA, ao contrário dos revestimentos impermeáveis, que drenam a água de chuva em sua superfície. Dessa forma, a água da superfície é removida mais rapidamente, o que aumenta a segurança viária.

É importante destacar que a CPA é utilizada em conjunto com uma camada de concreto asfáltico denso (impermeável), para que se protejam as camadas inferiores do pavimento da entrada de água, e conseqüente comprometimento estrutural, além de aumentar sua resistência às tensões as quais o pavimento é submetido. Assim, é uma tecnologia com potencial de aplicação em recapeamento de vias. A Figura 3 ilustra o princípio de funcionamento do pavimento, apresentando o esquema de fluxo perpendicular da água, em direção à borda do revestimento.

Figura 3 – Perfil do Pavimento (CPA)



Fonte: Oliveira (2003).

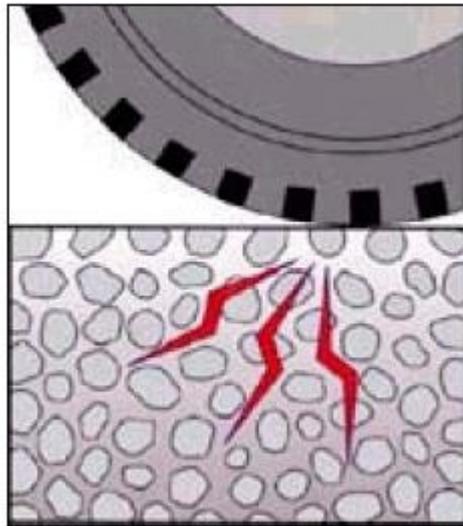
Os revestimento tipo CPA foram inicialmente aplicados na Europa, EUA e Japão, com especial primazia holandesa. Desde os anos 50, há registros de aplicação da pavimentação asfáltica porosa nos EUA, e a tecnologia acabou por ser empregada na Europa, no final dos anos 70 (ALVAREZ-LUGO *et al.*, 2014).

No Brasil, há registros de aplicação de CPA no ano de 1992, em um trecho experimental de 250 m de extensão localizado na Rodovia dos Bandeirantes (SP 348) como material de recapeamento da via (PORTO, 1999). O revestimento foi executado com ligante modificado (3,8% - SBS) e apresentou, em laboratório, 25% de índice de vazios. A autora acompanhou, após a execução, a evolução da permeabilidade e das condições visuais da superfície. Em cinco anos de operação, o pavimento sofreu cerca de 61% de redução da capacidade drenante – inicial 0,31cm/s e final 0,12cm/s. Quanto às condições estruturais, notou-se a presença de trincas, trilhas de roda e desgaste superficial. Dentre as patologias observadas, a mais preocupante foi a desagregação do revestimento, embora o trecho ainda se apresentava funcional.

O uso de CPAs apresenta diversos benefícios de sua implantação, tais como: redução do fenômeno de espelhamento noturno, redução da formação de spray (melhoria da visibilidade), redução do risco de hidroplanagem e derrapagem em condições de chuva, melhoria do conforto e segurança devido ao menor ruído de rodagem, e redução do consumo de combustível (COOLEY, Jr. *et al.*, 2009; ALVAREZ *et al.*, 2010; HERNANDEZ-SAENZ *et al.*, 2016).

O efeito de redução de ruídos de tráfego é possível tendo em vista que a principal fonte de ruídos em rodovias se dá pela interação pneu-pavimento. A presença de canais de vazios interligados no interior do revestimento (Figura 4) atenua os fenômenos de compressão e expansão do ar, que geram ruído (WATTS *et al.*, 1998). Dessa forma, há vários relatos de aplicações combinadas de defensas e pavimentação porosa, como medida de atenuação de poluição sonora causada por rodovias.

Figura 4 – Absorção sonora



Fonte: Japan Highway Research Institute (1999), apud Oliveira (2003).

Exemplos brasileiros recentes de aplicação de camada porosa, são quatro trechos da rodovia SP 021 (Rodoanel), conforme ilustrado na Figura 5, na região metropolitana de São Paulo, executados em 2009. O uso da CPA foi adotado como forma de mitigação de ruído, devido à presença de residências à margem da rodovia. A concessionária responsável pela rodovia tem uma expectativa de pelo menos 6 anos de vida útil da CPA (CCR VIA OESTE, 2016).

Figura 5 – Trecho de CPA no Rodoanel-SP



Fonte: Usicity (2016)

Apesar das vantagens apresentadas com a utilização de CPA, esta tecnologia não é bastante aplicada no Brasil pois acredita-se que devido à maior exposição da mistura às intempéries e a presença frequente de água no seu interior, o material acabando ficando exposto à situações mais agressivas, do ponto de vista de durabilidade, resultando em envelhecimento prematuro e redução da vida de fadiga. No entanto, há registro de rodovias revestidas por CPA com durabilidade superior a 10 anos, mesmo se tratando de rodovias projetadas há mais de duas décadas, com funcionalidade satisfatória (NICHOLLS, 1997). Segundo MO (2009), para a época de seu estudo, a durabilidade média de CPAs holandesas é 10-12 anos, enquanto os revestimentos asfálticos convencionais duram em média 18 anos.

Os principais danos que tipicamente abreviam a vida útil da CPA são: a perda gradual de permeabilidade devido ao entupimento dos vazios (fazendo com que sua principal função seja comprometida), desagregação e deformação permanente. As falhas são justificadas pelo tipo de estrutura do revestimento, em que o esqueleto é formado pela interação agregado-agregado, diferentemente dos concretos asfálticos densos

convencionais, em que a estrutura apresenta uma melhor distribuição de suas tensões internas. Dessa forma, a interação entre os agregados da CPA deve ser dotada de grande poder adesivo (FRIGIO *et al.*, 2013).

Dada à conformação estrutural interna da CPA, sua utilização se torna desafiadora em trechos submetidos a esforços tangenciais intensos, como estradas predominantemente íngremes e sinuosas, cruzamentos, pontos de ônibus, dentre outros, devido ao risco de desagregação. Outro desafio é a aplicação em regiões de zona rural, ou com contato direto com rodovias despavimentadas. Os veículos acabariam carreando os resíduos para os poros do pavimento, e gerariam a redução da sua principal característica, a drenabilidade.

Outra característica importante é o custo de implantação de revestimentos asfálticos porosos. Há um aumento nos custos de execução e manutenção, por se tratar de uma camada de revestimento mais espessa (camada porosa + convencional), e ainda, haver a necessidade de emprego de ligantes modificados, equipes de execução e manutenção mais capacitadas, maior controle tecnológico, adoção de fibras, manutenções mais frequentes, dentre outros fatores. Apesar do aparente aumento nos custos, como o acréscimo de 23 a 38% no custo total de construção e manutenção, em comparação ao revestimento asfáltico convencional, reportado por alguns estados americanos (HERNANDEZ-SAENZ *et al.*, 2016), deve ser considerada a redução de gastos decorrentes da diminuição de número e severidade dos acidentes rodoviários após a adoção de camadas porosas de atrito.

2.1.2 Projeto de misturas

Diversos são os métodos de dosagem adotados para definição de misturas asfálticas a serem utilizadas em camadas de revestimento de concreto asfáltico poroso. Há diversos registros de projeto de mistura em variadas partes do mundo.

No Brasil, a norma rodoviária brasileira DNER-ES386-99 estabelece a granulometria componente de CPA em massa, a ser satisfeita, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Dosagem da Camada Porosa de Atrito (DNER-ES386-99).

Faixas	I		II		III		IV		V	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Abertura [ABNT] 19,0 mm [3/4"]	-	-	-	-	-	-	-	-	100	
12.5 mm [1/2"]	100		100		100		100		70	100
9.5 mm [3/8"]	80	100	70	100	80	90	70	90	50	80
4.75 mm [No. 4]	20	40	20	40	45	50	15	30	18	30
2.00 mm [No. 10]	12	20	5	20	10	18	10	22	10	22
0,42 mm [No. 40]	8	14	-	-	6	12	6	13	6	13
0,18 mm [No. 80]	-	-	2	8	-	-	-	-	-	-
0.075 mm [No. 200]	3	5	0	4	3	6	3	6	3	6
Espessura da camada acabada, cm	3,0				≤ 4,0					
Ligante modificado por polímero, %	4,0 – 6,0									
Volume de vazios, %	18 -25									
Cântabro, %	≤ 25,0									
Resistência à tração por compressão diametral, 25 °C, MPa	≥ 0,55									

Fonte: DNER-ES 386/99, adaptado pelo autor.

Essa configuração granulométrica confere à camada um volume de vazios entre 18 e 25%, que são preenchidos pela água nos momentos de chuva. Nota-se que a norma brasileira requer o uso de ligante modificado por polímero para a dosagem de CPA.

Nos Estados Unidos, esse tipo de revestimento asfáltico recebe a nomenclatura *Open-graded Friction Course* (OGFC). A norma americana que trata de projeto de misturas de asfalto poroso é a ASTM D7064 - *Standard Practice for Open-Graded Friction Course (OGFC) Mix Design* (ASTM D7064, 2013). Esta norma apresenta requisitos mínimos e métodos de elaboração do projeto de mistura, que foram resumidos na Tabela 2.

Comparando os limites especificados pela norma brasileira (Tabela 1) e norma americana (Tabela 2), é possível notar que o teor de ligante adotado nos EUA é, na maioria dos estados, superior ao exigido no Brasil, variando entre 5,5 a 10%. Há, também, maior diversidade quanto ao tipo de ligante a ser utilizado nas misturas americanas, inclusive com ligantes modificados com adição de borracha. Nota-se ainda, que a ASTM D7064 é mais rigorosa que a brasileira do ponto de vista do limite

de desgaste para o ensaio Cântabro para misturas sem envelhecimento, tolerando um valor de até 20% enquanto o máximo permitido pela norma brasileira é de 25%.

Tabela 2 – Resumo dos requisitos de dosagem (ASTM D7064).

ESTADOS AMERICANOS	Arizona		Califórnia		Florida		Nevada		Wyoming		Geórgia		
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Graduação (abertura)													
12.5 mm [1/2"]	100		100		100		100		100		100		
9.5 mm [3/8"]	100		90	100	85	100	95	100	97	100	85	100	
4.75 mm [No. 4]	30	45	29	36	10	40	40	65	25	45	20	40	
2.36mm[No.8]	4	8	7	18	-	-	-	-	10	25	5	10	
2.00 mm [No. 10]	-	-	-	-	4	12	-	-	-	-	-	-	
1.18 mm [No. 16]	-	-	-	-	-	-	12	22	-	-	-	-	
0.075 mm [No. 200]	0	2,5	0	0	2	5	0	4	2	7	2	4	
Ligante Asfáltico	PG 64-16		PG 64-16 com 20 % asfalto borracha		AR 4000, AR 8000 ou PBA-6		AC 30 com 12 % asfalto borracha		AC 20P ou AC 30		PG 64-22 ou PG 70- 28		PG 67-22
Teor %	6,0		8,5 - 10		6,5 - 8,0		5,5 - 7,0		6,5		6,3 - 6,8		6,0 - 7,3
Volume de vazios %							≥ 18,0						
Cântabro %							≤ 20,0						
Escorrimento %							≤ 3,0						

Fonte: ASTM D7064 (2013), adaptado pelo autor.

Outros países apresentam também seus requisitos de dosagem de CPA, ficando evidente a preocupação com os parâmetros volumétricos (volume de vazios, teor e tipo de ligante e escorrimento) e mecânicos (desgaste Cântabro). Como exemplo, Madrid, em seu caderno de especificações técnicas gerais para a construção e infraestrutura municipal, apresenta condições para o projeto de misturas porosas. A Tabela 3 resume as principais informações do caderno de especificações.

Tabela 3 – Resumo dos requisitos de dosagem (Madrid).

MADRID ESPANHA	Passante acumulado em massa (%)		PARÂMETROS	CATEGORIA DE TRÁFEGO		
	TIPO DE MISTURA			Pesado	Médio	Leve
ABERTURA DA PENEIRA	PA 11	PA 16	% ligante		≥ 4,30	
22 mm	-	100	Índice de vazios %		≥ 20	
16 mm	100	90-100	Cântabro %	≤20	≤20	≤25
11,2 mm	90-100	-	Tipo de Ligante	BM-3c	BM-3a	B60/70
8 mm	50-70	40-60		BM-3a	BM-3b	B80/100
5,6 mm	-	-		BM-3b	B60/70	BC50/70
4 mm	13-27	13-27				
2 mm	10-17	10-17				
0,5 mm	5-12	5-12				
0,063 mm	3-6	3-6	Espessura	4 - 5 cm		

Fonte: Madrid (2011), adaptado pelo autor.

Outro exemplo pode ser visto nos requisitos apresentados pela Nova Zelândia. Apresentando sete granulometrias de projeto diferentes, o departamento de trânsito da Nova Zelândia apresenta as exigências para CPA no país. A Tabela 4 apresenta o resumo dos requisitos de dosagem. Interessante notar que a espessura dos revestimentos, em sua grande maioria, está entre 2,5 e 3,0 cm, números inferiores a Madrid e Brasil.

Tabela 4 – Resumo dos requisitos de dosagem - Nova Zelândia

Nova Zelândia	Tipo de Mistura						
	PA 10 HS	PA 10	PA 14	PA 7 HV	PA 10 HV	PA 14 HV	PA 20 HV
Graduação (abertura)							
26,5 mm	-	-	-	-	-	-	100
19 mm	-	-	100	-	-	100	85-100
13,2 mm	100	100	85-100	-	100	85-100	-
9,5 mm	85-100	85-100	35-50	100	85-100	10-25	10-25
6,7 mm	-	-	-	85-100	-	-	-
4,75 mm	30-40	20-40	12-22	10-30	10-30	7-20	7-20
2,36 mm	19-25	5-15	5-15	5-15	5-15	5-15	5-15
0,075 mm	2-5	2-5	2-5	1-5	1-5	1-5	1-5
Ligante asfáltico	80/100 ou 60/70						
Teor % (mín.)	4,5	4,5	4,0	4,5	4,0	4,0	4,0
Espessura mm (mín.)	25	25	30	20	25	30	50
Índice de vazios %	12-16	20-25	20-25	25-30	25-30	25-30	25-30
Cântabro % (máx.)	20	15	15	20	20	20	20

Fonte: Transit New Zealand (2007), adaptado pelo autor.

O que se nota, é a grande variabilidade de premissas de projetos de mistura para os revestimentos asfálticos tipo CPA, decorrentes de diferentes métodos de dosagem e diferentes direcionamentos normativos. Talvez, os fatores que corroboram para a dificuldade da difusão da tecnologia porosa no Brasil, seja a ausência de uma padronização de métodos de dosagem, além dos escassos e incipientes estudos que comprovem a eficiência da tecnologia para as condições brasileiras. Solucionando-se a problemática, provavelmente os órgãos públicos poderiam passar a aumentar a aplicação do CPA na pavimentação brasileira.

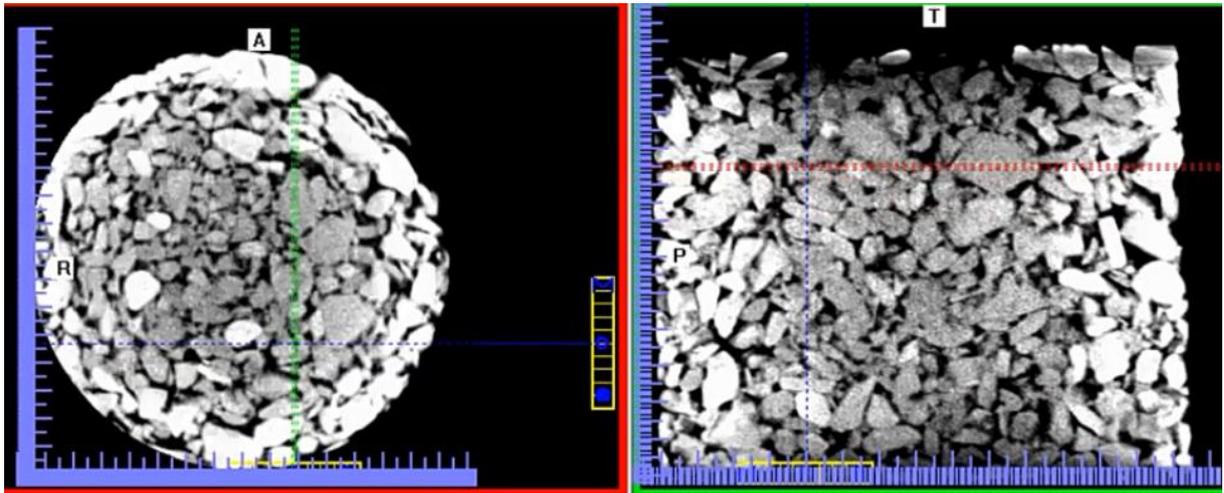
Hernandez-Saenz *et al.* (2016) sugerem que se busque a padronização da metodologia de dosagem de misturas porosas, assim como o há o Superpave, que padroniza o processo para misturas convencionais. Por exemplo, os autores identificaram nos EUA quatro metodologias para obtenção de teor ótimo de ligante para CPA: (1) baseada em parâmetros de corpos de prova compactados, (2) baseada na absorção dos agregados predominantes na mistura, (3) métodos visuais e (4) baseadas na combinação dos outros três métodos anteriores.

2.1.3 Desempenho de Misturas Porosas

2.1.3.1 Desagregação

Os revestimentos asfálticos porosos possuem uma estrutura interna que demanda alto poder adesivo do ligante, devido ao formato da estrutura: rocha-rocha, ou agregado-agregado, formando o esqueleto do revestimento, como ilustrado pela Figura 6, que apresenta imagens de tomografia computadorizada de uma amostra de CPA. Nota-se uma estrutura com grande dependência dos agregados graúdos e a formação dos canais interconectados que permitem a drenagem superficial do pavimento. Essa conformação se dá pela reduzida presença de finos e pela faixa granulométrica aberta da composição de agregados utilizados, fatores esses que, se ausentes, proporcionariam o preenchimento dos vazios e uma melhor distribuição das tensões internas.

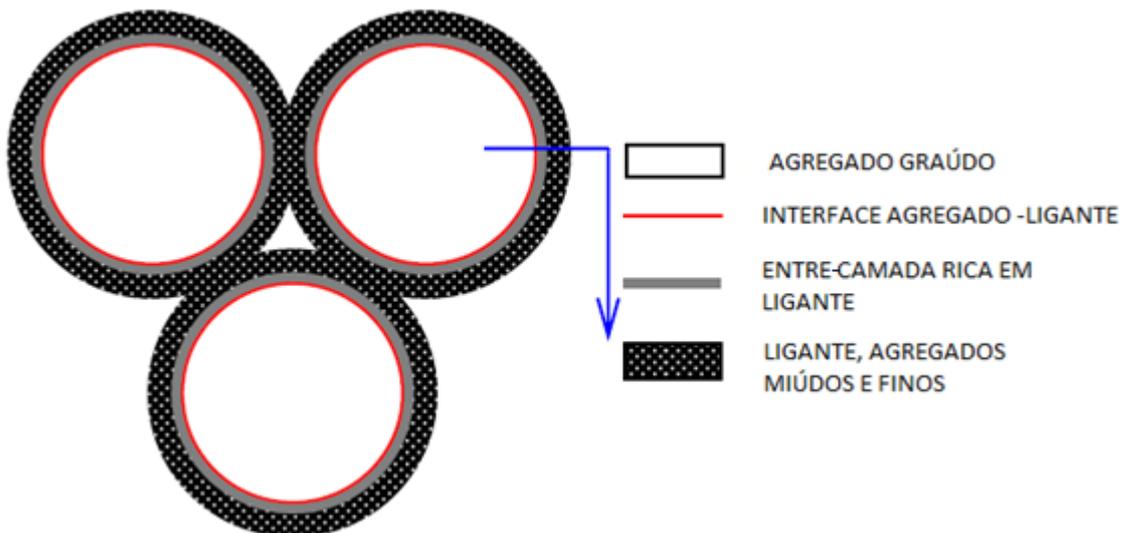
Figura 6 – TC_CPA – vista superior (esq.) e transversal (dir.)



Fonte: Trigos e Caro (2016).

A Figura 7 esquematiza a estrutura da mistura tipo CPA, apresentando três regiões diferentes, como apontado.

Figura 7 – Estrutura esquemática de asfalto poroso



Fonte: MO (2009).
Nota: Traduzida pelo autor.

É possível verificar que as zonas de contato (ligação) entre os agregados graúdos são diminutas, e são uma das parcelas responsáveis pela estabilidade estrutural do

revestimento. Se essa ligação entre agregados falha, ocorre o fenômeno de desagregação, ou *ravelling*, como se denomina em inglês na literatura internacional.

A desagregação pode se dar por dois mecanismos: falha adesiva ou falha coesiva. A falha coesiva se dá pelo desenvolvimento de microtrincas na camada rica em ligante. Já a falha adesiva ocorre pela perda de adesão entre a argamassa asfáltica (matriz de agregados finos) e o agregado graúdo (MO, 2009).

A desagregação é um dos problemas mais predominantes em CPAs, sendo o motivo mais recorrente para manutenções no pavimento (MO *et al.*, 2014). A Figura 8 ilustra o fenômeno.

Figura 8 – Desagregação superficial em asfalto poroso



Fonte: Alvarez-Lugo *et al.* (2014).

O envelhecimento (oxidação) excessivo do ligante, a presença de água frequente no interior do revestimento – os agregados tem mais afinidade por água do que pelo ligante; e tensões decorrentes da poro-pressão –, e a fadiga do ligante, em

decorrência dos carregamentos sucessivos, são importantes fatores que levam à desagregação do revestimento (POULIKAKOS; PARTL, 2009).

O processo de oxidação se dá pela exposição do ligante asfáltico ao oxigênio atmosférico, raios ultravioletas e calor, e ocorre durante as etapas de mistura e compactação (curto prazo), e à longo prazo, durante o serviço do pavimento (MOUILLET *et al.*, 2014). Devido à natureza porosa da CPA, há uma maior preocupação com o processo de envelhecimento do pavimento, devido à maior exposição ao oxigênio no interior dos vazios do revestimento.

O envelhecimento do asfalto é um processo irreversível que altera as características viscoelásticas do ligante, o que acaba por alterar as características do pavimento como um todo. Em decorrência da oxidação do ligante, ocorre aumento da rigidez da mistura. Apesar de benéfica do ponto de vista de resistência a deformação permanente, a oxidação acarreta em uma perda de desempenho quanto a resistência à fadiga e aumento da susceptibilidade à danos devido a umidade (DAS *et al.*, 2015). Em CPAs, a principal consequência da exposição à umidade é a desagregação.

Para avaliar a susceptibilidade à desagregação à curto e longo prazo, a maioria dos estudos fazem uso do ensaio de Abrasão Los Angeles, assim como definido pela norma ASTM D7064. Por exemplo, Mallick *et al.* (2000) avaliando diferentes misturas porosas (com variação do % de agregado passante na #4,75mm) com teor médio de ligante de 5,5% (PG64-22), obteve os valores de resistência à abrasão que estão apresentados na Tabela 5, bem como o percentual de vazios (Vv). É possível notar um aumento no % de desgaste em decorrência do aumento de Vv.

Tabela 5 – Resultados de resistência à abrasão

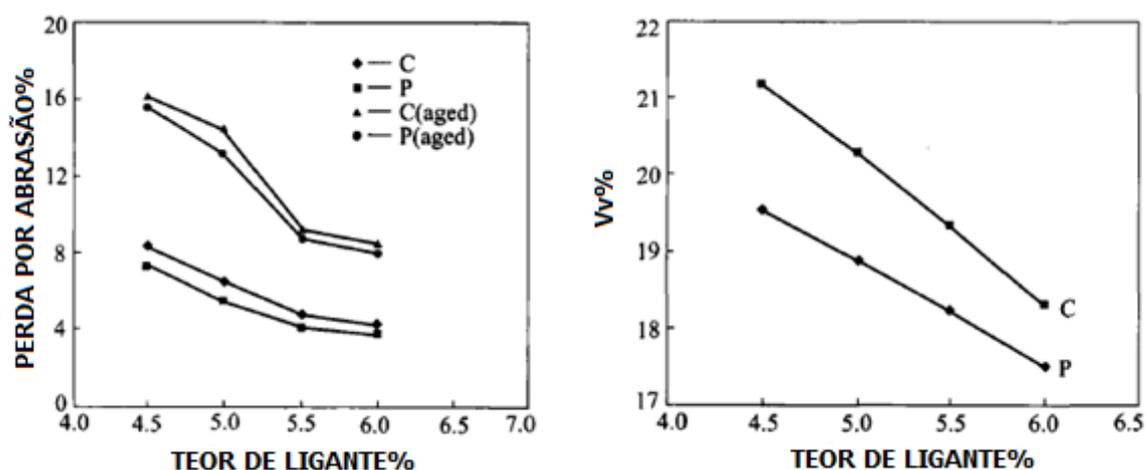
MISTURA (% passante na #4,75mm)	DESGATE (%)	DESGASTE ENVELHECIDO (%)	Vv MÉDIO (%)
15	14,7	29,3	15,1
25	12,1	19,6	14,3
30	11,7	17,2	13,6
40	8,1	15,5	12,5

Fonte: Mallick *et al.* (2000)

Outro exemplo é o trabalho de Wu *et al.* (2006), que avaliaram os efeitos da adição de fibras de celulose (C) e de poliéster (P) em misturas asfálticas porosas. Um dos

ensaios da avaliação é a resistência à abrasão Los Angeles, cujos resultados são apresentados na Figura 9, juntamente com os percentuais de vazios das misturas. As misturas foram feitas com ligante PG76-22, modificado por polímero SBS e o processo de envelhecimento dos corpos de prova se deu por acondicionamento em estufa à 60°C por 7 dias, procedimento em consonância com a ASTM D7064.

Figura 9 – Resultados de Perda por Abrasão e Vv



Fonte: Wu *et al.* (2006), adaptado pelo autor.

Além de ensaios laboratoriais, a desagregação de CPAs também pode ser verificada através de uso de ferramentas computacionais, como mostrado em estudo de Mo *et al.* (2010), onde os autores analisaram a influência do efeito simultâneo de carregamentos decorrentes de tráfego e variação de temperatura, na ocorrência da desagregação de revestimentos asfálticos porosos. A análise se deu através de uma simulação de elementos finitos aplicada a um ensaio, denominado *Lifetime Optimization Tool* (LOT), que permite a análise de desagregação em misturas asfálticas. A simulação, basicamente, traduz os carregamentos de tráfego, geometria da mistura e a resposta da argamassa asfáltica, em função de tensão e deformação em vários locais da mistura. Os autores concluem que a temperatura afeta diretamente o fenômeno, com falhas adesivas ocorrendo em baixas temperaturas (<5°C) e falhas coesivas em temperaturas mais elevadas (>5°C). Para temperaturas mais elevadas, os resultados obtidos da análise de fadiga da argamassa asfáltica sugerem a adoção de ligante betuminoso mais rígido, para melhoria de desempenho

da mistura, havendo ainda, melhoria no desempenho, com a adoção de ligantes modificados por polímeros (utilizado o SBS) e com o envelhecimento inicial do ligante – o que o torna mais rígido.

2.1.3.2 Escorrimento

Outro fator que influencia o desempenho estrutural de CPAs é o escorrimento do ligante betuminoso. O escorrimento pode ocorrer na etapa de produção, transporte ou aplicação do revestimento (curto prazo), ou ainda, durante a vida de serviço do pavimento (longo prazo). Em CPAs, esse fenômeno é explicado pela sua estrutura predominantemente pétreo, pelo elevado volume de vazios da mistura, pela busca por um maior teor de ligante possível para aumentar a durabilidade do pavimento. Somado a isso, há a redução da viscosidade do ligante quando submetido a altas temperaturas de usinagem e compactação empregadas (em geral de 135-177°C), além das altas temperaturas que o revestimento pode ser submetido durante estações mais quentes do ano. À altas temperaturas, o ligante betuminoso se comporta como um líquido newtoniano e há uma tendência de fluxo de ligante para as camadas inferiores do revestimento/mistura por efeito da gravidade, até que encontra uma temperatura mais baixa e se solidifica. Como resultado, têm-se a redução localizada de permeabilidade e aumento do risco de desagregação (LYONS e PUTMAN, 2013).

Com o escorrimento, o ligante forma uma camada impermeabilizante na porção inferior do revestimento e a porção superior sofre redução teor de ligante, restando uma fina película de ligação entre os componentes, propiciando uma maior chance de desagregação dos agregados superficiais (PUTMAN e LYONS, 2015).

Na Figura 10a, é possível verificar o escorrimento em misturas do tipo SMA (*Stone Matrix Asphalt*), de granulometria descontínua. A mesma mistura, quando dotada de fibras, teve o escorrimento reduzido, como mostrado na Figura 10b.

Figura 10 – Escorrimento em SMA a) sem fibras e b) com fibras

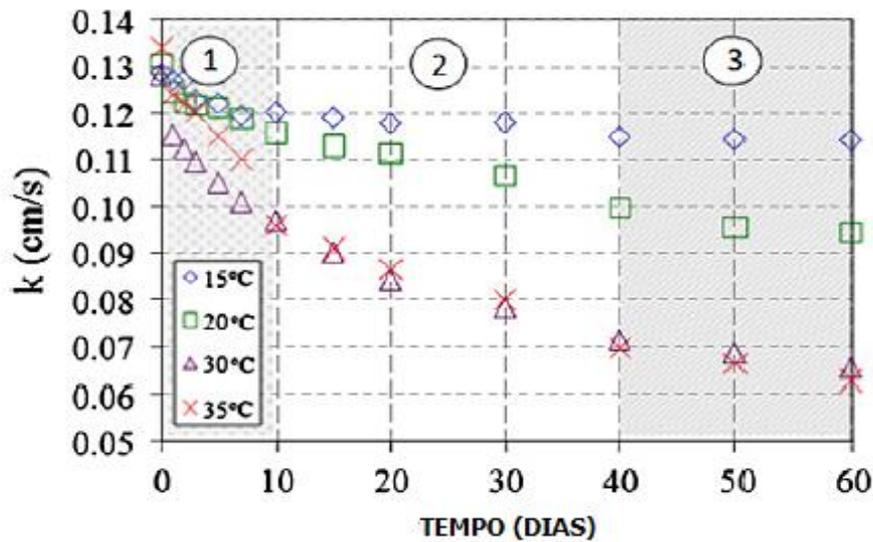


Fonte: Tuchumantel Júnior (2016).

Hamzah *et al.* (2012) avaliaram os efeitos do escorrimento na perda de permeabilidade de misturas porosas, usinadas com ligante convencional (classificação por penetração 60/70) ao teor de 4,7%, sem adição de fibras. As avaliações de permeabilidade foram realizadas antes, durante e após o processo de condicionamento dos corpos de prova: manutenção constante dos corpos de prova (CP) à quatro diferentes temperaturas 15, 20, 30 e 35°C. Para o ensaio de permeabilidade, foi utilizado um permeômetro de carga variável especialmente desenvolvido para o estudo, que avalia o CP dentro do próprio molde do processo de compactação Marshall, sem ser desmoldado.

Os autores verificaram uma redução superior à 50% de permeabilidade inicial (0,134cm/s), após 60 dias de exposição, de CPs sob condicionamento frequente a 35°C. As amostras condicionadas às outras temperaturas também apresentaram redução de permeabilidade, todavia com menor percentual de redução, como ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Redução de permeabilidade devido ao escorrimento de ligante



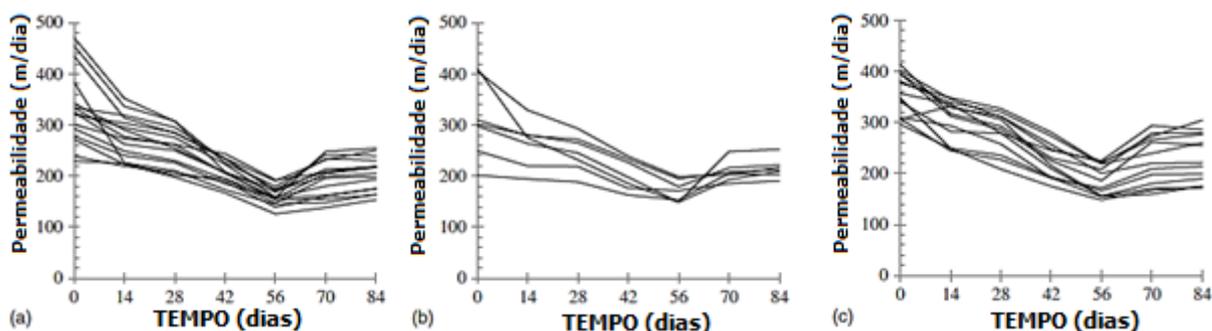
Fonte: Hamzah *et al.* (2012), adaptado pelo autor.

Putman e Lyons (2015) buscaram compreender a influência do fenômeno de escorrimento a longo prazo na funcionalidade e durabilidade de misturas porosas, através da correlação com a perda de permeabilidade. Para tal, monitoraram a permeabilidade de misturas compactadas por um período de até 84 dias, condicionadas em estufa à 60°C, em três tipos diferentes de mistura: ligante SBS sem fibras, ligante SBS + fibras de celulose (0,3%) e ligante modificado por borracha de pneu sem fibras. Para os ensaios de permeabilidade, os autores utilizaram um permeômetro de carga variável de parede rígida desenvolvido pelos próprios autores. Complementarmente, após todos os ensaios de permeabilidade, foi realizado o corte dos CPs em 4 discos transversais de igual espessura para avaliar o teor de ligante real dos discos, podendo, dessa forma, compreender o fluxo de ligante através das camadas do revestimento asfáltico.

Para todas as misturas, os autores notaram redução de permeabilidade até os 56 dias, entretanto, houve ligeiro aumento de permeabilidade entre os 56 e 84 dias, conforme ilustrado na Figura 12 – fenômeno não compreendido pelos autores. As fibras de celulose, apesar de auxiliarem na prevenção de escorrimento durante a produção da mistura, não mostraram evitar o escorrimento de longo prazo, pois o comportamento da mistura com SBS + fibras foi similar ao comportamento da SBS sem fibras frente à perda de permeabilidade, e frente ao aumento do teor de ligante médio (aprox.

+0,25%) na camada inferior dos CPs, comparado ao teor inicial médio de todo o CP. As misturas com ligante modificado por borracha moída de pneus mostraram-se mais resistentes ao escorrimento de longo prazo.

Figura 12 – Permeabilidade x Tempo: a) SBS + Fibra, b) Borracha Pneus e c) SBS sem Fibras.



Fonte: Putman e Lyons (2015), adaptado pelo autor.

2.1.3.3 Deformação Permanente

Outra manifestação patológica que deve ser levada em consideração no projeto de misturas CPA são as deformações permanentes no pavimento, devido à conformação da estrutura do revestimento e ao carregamento que o pavimento é submetido. A deformação permanente tem sido minimizada através da utilização de ligantes modificados por polímeros, que apresentam maior viscosidade e aumentam a rigidez da mistura asfáltica. O fenômeno pode se dar por falhas nas camadas inferiores do pavimento ou por problemas no revestimento asfáltico. Em pavimentos porosos, estão muito mais relacionados ao revestimento asfáltico, do que às camadas inferiores do pavimento. Os problemas no revestimento estão relacionados à fluência de material (elástico ou plástico) e ao dano ao material, com o surgimento e propagação de trincas (BERNUCCI *et al.*, 2010).

A utilização do polímero estireno-butadieno-estireno (SBS), como modificador do ligante asfáltico, é a medida mais frequentemente utilizada por diversos autores para atenuar as deformações permanentes. A presença do SBS reduz o escorrimento da mistura, aumenta significativamente seu desempenho estrutural aumentando sua estabilidade, resistência à fadiga e à tração e minimizando a desagregação, sem alterar significativamente a permeabilidade da mistura.

Há ainda estudos que mostram que ligantes modificados por borracha de pneu alteram significativamente o desempenho da mistura. Como resultado tem-se melhor resistência à fadiga, menor sensibilidade à presença de água e variações de temperatura e o aumento da estabilidade Marshall. Entretanto, as misturas acabam apresentando drenagem sensivelmente inferior às misturas que não empregam asfalto-borracha. Dessa maneira, melhora-se a vida útil, porém, reduz-se uma das principais capacidades do revestimento: drenagem (PARTL *et al.*, 2010; MOMM e DUMKE, 2004).

Alguns estudos buscam compreender o efeito da modificação de ligantes por polímeros na resistência à deformação permanente de CPAs.

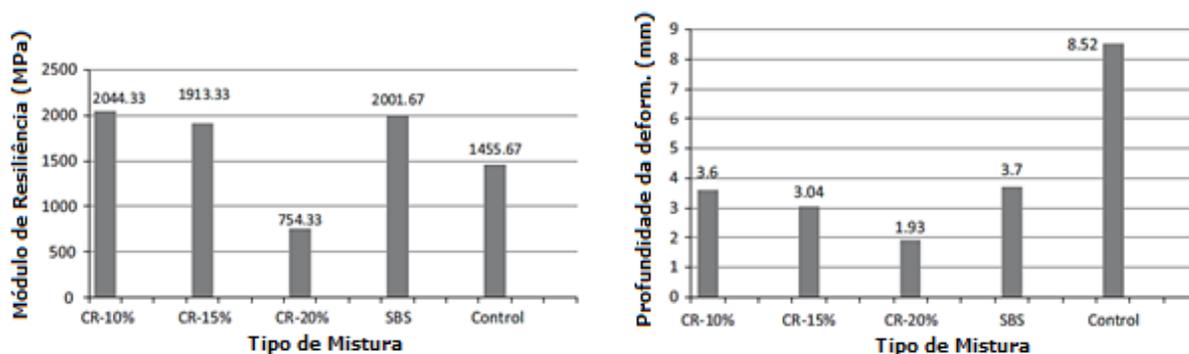
Jeong *et al.* (2011) avaliaram a deformação de misturas utilizando ligante asfáltico modificados por três tipos diferentes de polímero: SBS (3%), polietileno de baixa densidade (PBD – 6%) e pó de borracha de pneu (12%). Os autores utilizaram um simulador de tráfego APA (*Asphalt Pavement Analyzer*), e após 8000 ciclos de carregamento, à uma pressão de 690KPa e à 64°C, os autores concluíram que as misturas estudadas apresentaram excelente comportamento quanto à deformação, ficando todas as profundidades dos sulcos inferiores a 5mm. Ainda, o PBD apresentou o melhor desempenho (1,18mm), seguido do modificado por borracha de pneu (3,55mm) e por fim o SBS (4,43mm).

Liu e Cao (2009) avaliaram a influência da adoção de diferentes ligantes (puro, SBS e de alta viscosidade) na resistência a deformação permanente de misturas porosas. Os autores utilizaram o ensaio de deformação permanente em trilha de roda, similar ao ensaio Hamburgo (*Hamburg Wheel Tracking Test*), conforme a norma chinesa (JTJ 052) em condição seca e em condição submersa, *i.e.*, após uma imersão em água à 60 °C durante 48h. Para ambas as condições, a pressão adotada para o ensaio é 0,7MPa e a temperatura de 60°C. Como resultado, para um índice de vazios próximo de 19,5%, as misturas com ligante de alta viscosidade obtiveram melhor resistência à deformação permanente, seja na condição normal ou imersa (8,98 e 5,50 mil carregamentos/mm), seguidos das misturas com SBS (1,74 e 0,58 mil carregamentos/mm) e com pior desempenho, as misturas com ligante puro (1,09 e 0,50 mil carregamentos/mm).

Uma forma de se avaliar a susceptibilidade à deformação permanente indiretamente seria pela avaliação da rigidez das misturas asfálticas através da realização de ensaios de módulo de resiliência. Exemplo disso, é o trabalho de Shirini e Imaninasab (2016), que buscaram avaliar os efeitos da adição de borracha moída de pneus em misturas tipo CPA. Dentre os ensaios realizados, os autores avaliaram o módulo de resiliência (MR) por compressão diametral e susceptibilidade a deformação permanente por ensaio Hamburgo de trilha de roda (*Hamburg Wheel Tracking Test - HWT*).

Os resultados obtidos apontam para a estreita relação entre os valores de MR e susceptibilidade a deformação permanente, em que, quanto menor o valor de MR, menor será o valor da deformação obtido nos ensaios. A Figura 13 ilustra os resultados obtidos pelos autores, onde se constata indícios da relação entre MR e deformação permanente. Uma abordagem mais aprofundada sobre essa correlação é apresentada em 3.3.5.

Figura 13 – Resultado de a)MR e b)Afundamento de trilha de roda (HWT)



Fonte: Shirini e Imaninasab (2016), adaptado pelo autor.

2.1.3.4 Permeabilidade

Um importante processo que reduz o desempenho das misturas porosas é a perda de sua permeabilidade à longo prazo, pelo fechamento de seus vazios. É um fenômeno natural dos revestimentos com alto índice de vazios e ocorre ao longo de sua vida útil, devido ao carreamento de resíduos, por parte dos veículos, e às diversas fontes de poluição ambiental, além do escorrimento do ligante e deformação permanente. Porto (1999) afirma ser comum a redução da permeabilidade, após um ano da aplicação do

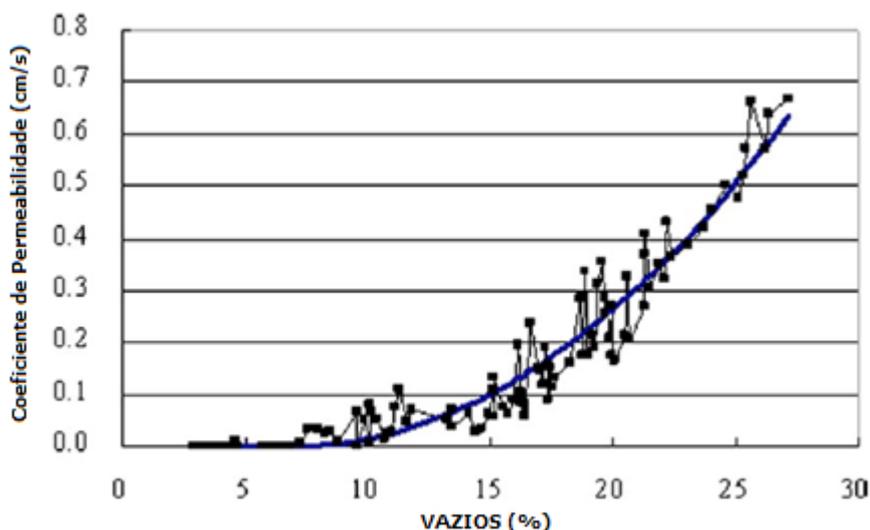
revestimento, de até 50%. Ainda, o entupimento depende de fatores, como: quantidade de poluição do ambiente, tamanho da estrutura dos vazios do revestimento, declividade da camada subjacente à camada porosa e velocidade do tráfego e seu efeito de limpeza dos poros.

Para o bom funcionamento do pavimento e garantia de drenabilidade, o valor recomendado para o coeficiente de permeabilidade (k) de misturas tipo CPA é de 100m/dia, ou 0,1157cm/s, valor válido para misturas novas (ASTM D7064, 2013).

Coleri *et al.* (2013) avaliaram os efeitos do tráfego e ação de intempéries no entupimento de CPAs. Corpos de prova prismáticos com índice de vazios variando entre $35 \pm 2,5\%$ e com média de coeficiente de permeabilidade inicial de 0,15cm/s, produzidos com e sem ligante modificado por polímero, foram aplicados em uma pista experimental e submetidos à carregamentos cíclicos por simulação de veículos pesados. Ainda, realizaram simulações de chuvas com adição de particulados, seguidos de ensaios de tomografia computadorizada. Para os pavimentos produzidos com ligante modificado por polímero (PG76-22), foi percebida uma redução no índice de vazios do revestimento (22-25% de redução), devido à deformação permanente provocada pela simulação de tráfego pesado, fato que os autores acreditam justificar a redução de permeabilidade (45-53% de redução). Já as misturas com ligante convencional (PG64-10), apresentaram maior redução do índice de vazios (cerca de 35%), associada a uma redução de permeabilidade superior a 90%, causada por uma maior deformação permanente. Por outro lado, a adição de materiais particulados, nas simulações de chuva (15 anos), para simular a poluição natural do pavimento, não alteraram significativamente a drenabilidade do pavimento, notando-se apenas uma tendência de perda de permeabilidade na porção inferior do revestimento.

Liu e Cao (2009) produziram misturas asfálticas com índice de vazios variando de 3 a 27%, com objetivo de avaliar a relação entre índice de vazios e permeabilidade. Realizaram ensaios de permeabilidade conforme a normatização chinesa para pavimentos asfálticos JTJ 052-2000. Os autores concluíram que a relação entre os dois fatores não é linear, como pode ser verificado na Figura 14. Verifica-se que as misturas atingiram valores satisfatórios de permeabilidade ($>0,1157\text{cm/s}$) a partir de índice de vazios superiores a 17%.

Figura 14 – Relação entre índice de vazios e coeficiente de permeabilidade



Fonte: Liu e Cao (2009).

Kayhanian *et al.* (2012) avaliaram o revestimento asfáltico drenante de 20 diferentes estacionamentos na Califórnia, através de ensaios de permeabilidade in situ (Permeâmetro de campo NCAT) e de tomografia computadorizada de amostras extraídas dos estacionamentos. Vários fatores foram estatisticamente analisados, como nível de tráfego, cobertura vegetal, acumulação de sedimentos, frequência de manutenção, presença de trincas e chuvas anuais médias. Os autores atribuem como principal influência para o entupimento, a idade do pavimento. Em que, quanto mais idade, em geral, maior redução de permeabilidade apresenta. Outros fatores também foram analisados, e com uma inferior significância, também mostraram influenciar o entupimento: o número de dias do ano com temperatura superior a 30°C e a quantidade de vegetação próxima ao estacionamento (quanto maior, maior entupimento, para ambas).

Mallick *et al.* (2000) verificaram a influência na permeabilidade das misturas causada por diferentes percentuais de agregados passantes na peneira de abertura #4,75mm. Para tal, usinaram 4 diferentes misturas com o mesmo teor de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), classificação PG 64-22, variando o percentual passante de agregados através da peneira 4,75mm, como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição granulométrica das misturas utilizadas

ABERTURA PENEIRA	PERCENTUAL PASSANTE			
	MISTURA SIMILAR À FHWA	MISTURA #1	MISTURA #2	MISTURA #3
19 mm	100	100	100	100
12.5 mm	95	95	95	95
9.5 mm	65	65	65	65
4.75 mm	40	30	25	15
2.36 mm	12	7	7	7
0.075 mm	4	3	3	3

Fonte: Mallick *et al.* (2000), adaptado pelo autor.

Os autores, através de ensaios com permeâmetro de carga variável (Florida DOT), observaram que há um significativo aumento da permeabilidade de misturas com menores percentuais passantes na peneira 4,75. Para os percentuais passantes de 40, 30, 25 e 15, os coeficientes de permeabilidade foram, respectivamente 0,024, 0,032, 0,102 e 0,135 cm/s. Entretanto, observou-se maior percentual de escorrimento e perda por abrasão. Ainda que quase todos os resultados ficaram com valores inferiores aos limites estabelecidos pela ASTM D7064 (2013), o escorrimento para a mistura de percentual passante de 15% ultrapassou o limite (0,3%) com o valor de 0,45%. Ou seja, para as condições de estudo dos autores, é possível concluir que quanto mais pétreo (menos finos) a mistura, maior será o coeficiente de permeabilidade, todavia devem ser observadas as consequências para os demais comportamentos da mistura.

2.1.3.5 Utilização de fibras

A utilização de fibras é uma alternativa para se combater o escorrimento de ligante em misturas de granulometria aberta. Assim, reduz-se o risco de desagregação do pavimento (HASSAN; AL-JABRI, 2005). Além disso, outras vantagens são avaliadas, como aumento da resistência à deformação permanente e à fadiga. Sabe-se que, em

pavimentos asfálticos densos, a presença de fibras melhora o comportamento estrutural, melhorando sua resistência e estabilidade (HAGOS, 2008). Há na literatura, os mais variados estudos sobre a utilização de fibras, sejam minerais ou naturais.

As fibras de celulose, por exemplo, têm sido empregadas em misturas asfálticas porosas com o objetivo de redução do escoamento de ligante em todas as etapas do revestimento: produção, transporte, execução e uso (LYONS; PUTMAN, 2013; WURST; PUTMAN, 2013).

O emprego de fibras de celulose, geralmente à 0,3% em relação ao peso total da mistura, não altera significativamente o desempenho mecânico do revestimento, como observado por Hassan, Al-Oraime e Taha (2005). Os autores notaram haver diferença insignificante no desgaste Cântabro, entre mistura porosa com fibras, e sem fibras. Entretanto, ao serem adicionadas à mistura, as fibras de celulose tornam o ligante mais viscoso, o que, do ponto de vista do escoamento, permite o emprego de um maior teor de ligante na mistura.

Wurst e Putman (2013) obtiveram teor ótimo de ligante de 7,5%, com sugestão de que 8% não traria problemas à mistura, ou seja, a presença de fibras permite o aumento do teor de ligante sem causar problemas de escoamento. Um maior teor de ligante, melhora as propriedades mecânicas nas misturas de CPA, aumentando, principalmente, a resistência ao desgaste. Todavia, todos os autores observam uma redução de permeabilidade das misturas em função da presença de fibras, mesmo se comparando misturas porosas com teores de vazios próximos (DUMKE, 2005; LYONS; PUTMAN, 2013; WURST; PUTMAN, 2013; HASSAN; AL-ORAIME; TAHA, 2005; CHEN *et al.*, 2013).

Chen *et al.* (2013) analisaram a performance e durabilidade de misturas porosas produzidas de diferentes combinações de três ligantes, AR-80 convencional (AR) e modificados por polímeros SBS a 5% (PMA) e 12% (HVA), com dois diferentes aditivos, fibra de celulose à 0,3% da massa total (F) e cal hidratada 2% da massa seca dos agregados (L), como ilustrado na Tabela 7, bem como os respectivos teores de ligante de cada mistura.

Tabela 7 – Tipos de misturas estudadas por Chen *et al.* (2013)

MISTURA	LIGANTE	GRADUAÇÃO	TEOR LIGANTE (%)	ADITIVO
AR	AR-80	Aberta	5,0	Nenhum
PMA	SBS-modified	Aberta	5,0	Nenhum
HVA	Heavy SBS-modified	Aberta	5,0	Nenhum
AR-LF	AR-80	Aberta	5,2	Cal e fibras
PMA-LF	SBS-modified	Aberta	5,2	Cal e fibras
HVA-L	Heavy SBS-modified	Aberta	5,2	Cal

Fonte: Chen *et al.* (2013), adaptado pelo autor.

O desenvolvimento das misturas foi baseado em critérios de durabilidade (resistência ao desgaste Cantabro) e escorrimento de ligante – apesar de não terem apresentado os resultados para escorrimento. Os autores executaram diferentes ensaios, como a verificação de índice de vazios, permeabilidade (k) (Permeâmetro de carga variável) e resistência à tração por compressão diametral (RT) e resistência à deformação permanente (RDP) (simulador de tráfego similar ao Hamburgo), e alguns resultados aproximados são sumarizados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resumo dos resultados de Chen *et al.* (2013).

MISTURA	DESGASTE (%)	DESGASTE ENVELHEC. (%)	Vv (%)	k (cm/s)	RT (MPa)
AR	18,0	59,0	19,0	0,20	0,42
PMA	15,0	31,0	20,0	0,20	0,72
HVA	10,0	22,0	22,0	0,22	0,82
AR-LF	16,0	43,0	21,0	0,15	0,49
PMA-LF	12,0	26,0	21,0	0,16	0,79
HVA-L	8,0	19,0	22,0	0,19	0,92

Fonte: Chen *et al.* (2013).

Dada a utilização de fibras e cal, foram observadas melhorias para resistência ao desgaste e estabilidade nos ensaios de simulação de tráfego, entretanto não conclusivas, uma vez que além de adicionar as fibras, houve adição de cal hidratada, além de um incremento de 0,2% no teor de ligante para as misturas com adições.

Ainda, foi observada uma redução de permeabilidade de misturas com adição de fibras. Os autores justificam a redução de permeabilidade devido à redução da interconexão entre os vazios da mistura, que a presença das fibras causa, o que atrapalha o fluxo de água dentro dos poros do pavimento, uma vez que a redução de índice de vazios não acompanha significativamente a redução de permeabilidade.

Leal (2013) analisou a utilização de fibras de bagaço de cana-de-açúcar, como aditivo estabilizante para misturas do tipo SMA. Para tal, realizou ensaios com as fibras de bagaço e os comparou à ensaios com fibras de celulose, ambas à 0,3% em massa total. Como resultado de um teste piloto com teor de 6,5% de CAPFLEX B – (CAP modificado por borracha de pneus), o autor conclui que a adição de fibras de bagaço não alterou significativamente a sensibilidade ao escorrimento das misturas. Todavia, os resultados podem ter sido influenciados pelo fato do autor ter adicionado as fibras antes do processo de aquecimento dos agregados, o que sujeitou o material a uma temperatura de 190°C. Nas demais, convencionou adicionar as fibras apenas no momento de mistura com o ligante asfáltico.

Passado o teste piloto, o autor procedeu à dosagem da mistura, e obteve como teor ótimo 6,7% de ligante, para um teor de vazios teórico de 4%. Dessa forma, analisou o desempenho das misturas em laboratório através de ensaios de escorrimento, estabilidade, resistência à tração e outros. Para o novo ensaio de escorrimento, o autor utilizou dois tipos de ligante (CAPFLEX-B e CAP30/45) e dois tipos de fibras (celulose e BCA), entretanto, as fibras de BCA foram empregadas em três diferentes tamanhos: <1,2mm, <0,6mm e <0,3mm. Através de análises de regressão, Leal (2013) constatou que o tamanho das fibras tem correlação significativa com o resultado do escorrimento, independente do ligante utilizado, de modo que há uma tendência de redução do escorrimento à medida que se aumenta o tamanho das fibras de BCA.

Dessa forma, apesar do inferior desempenho na redução de escorrimento comparada às fibras de celulose (Escorrimento médio: CEL= 0,058% e BCA=0,113%), o autor constatou, por meio de análise de variância, que a adição de fibras de BCA altera significativamente os resultados de escorrimento, com sua presença na mistura reduzindo o escorrimento. Ainda, as propriedades mecânicas das misturas com bagaço são semelhantes às com celulose: resistência à tração, estabilidade Marshall, desgaste Cântabro, módulo de resiliência e, inclusive, o percentual de vazios. O autor

conclui, ainda, que a substituição das fibras de celulose, por fibras de bagaço de cana-de-açúcar, em misturas tipo SMA, é viável, pois além de realizar ensaios laboratoriais, avaliou a construção de um trecho experimental de SMA na BR356/RJ.

Após 18 meses da construção do trecho, análises de campo, através de ensaios de mancha de areia, drenabilidade, pêndulo britânico, medida do afundamento na trilha de roda e medida de deflexões com viga Benkelman, revelaram bom desempenho do pavimento, respeitando limites estabelecidos pelas normas nacionais e sem apresentar trincas e deformações permanentes excessivas (LEAL, 2013).

Homem (2002) avaliou a adoção de fibras de vidro em misturas porosas. Apesar de algumas melhorias serem verificadas, o autor atribui ao teor de ligante, a principal responsabilidade pelo desempenho mecânico da mistura. Ainda, verificou uma sensível redução da permeabilidade do revestimento, quando da aplicação de fibras. Por fim, o autor conclui que os ensaios mostraram que a utilização de fibras de vidro não conferiu significativas vantagens, em relação às misturas sem fibras.

Além do emprego das fibras de celulose - que é bastante difundido -, outras fibras naturais já foram estudadas, quanto ao seu emprego em pavimentos asfálticos porosos. Exemplo disso, é o trabalho de Hassan e Al-Jabri (2005), em que avaliaram a adoção de fibras de tamareira e fibras têxteis. As conclusões dos autores apontam para a melhoria da resistência ao desgaste - por exemplo, para misturas com 5,5% de teor de ligante, redução aproximada de 40% para 18% -, como a principal vantagem do uso das fibras de tamareira, enquanto o uso de fibras têxteis foi mais eficiente em reduzir o escorrimento da mistura - para misturas com 6,0% de ligante, redução aproximada de 1,9% para 0,35%.

O emprego de fibras, em pavimentação porosa, apresenta uma grande variedade de estudos, como o de Punith e Veeraragavan (2011), que avaliaram o emprego de fibras de polietileno de baixa densidade (PEBD), oriundas de sacolas plásticas domésticas. Nesse caso, as fibras não foram competentes em reter o ligante, e evitar o escorrimento, para teores superiores à 5% de ligante. Todavia, algumas melhorias foram observadas, se comparadas às misturas sem fibras, como: redução do desgaste por abrasão das misturas envelhecidas em 22,87%, aumento médio da resistência à tração em 62% (à 25°C, aumento de 0,261 para 0,384MPa), aumento da resistência à fadiga e à deformação permanente. Em contraponto, como ocorre no

emprego de outros tipos de fibras, a adição das fibras de PEBD reduziram em média a permeabilidade em 14,4%, para as misturas com teor de ligante ótimo.

2.2 FIBRAS NATURAIS

As fibras naturais são materiais de baixo custo, e geralmente subprodutos de processos industriais. Dentre as várias possibilidades de destinação do resíduo, uma alternativa é a utilização como combustível no próprio parque industrial, retornando ao processo produtivo e sendo produto para a produção de energia elétrica – o que gera poluição atmosférica (BORLINI, 2006). Entretanto, parte dos subprodutos que contêm fibras naturais ainda são destinados a aterros sanitários.

A composição química, bem como seu formato e, conseqüentemente, desempenho dependem da origem da fibra, podendo haver variações em decorrência do cultivo: região, clima, adubação, etc. (BORLINI, 2006).

2.2.1 Fibras de Cana-de-Açúcar

Usinas processam a cana-de-açúcar, para a extração da porção líquida do caule da planta. O caldo extraído é utilizado na produção de etanol e açúcar, e o bagaço – que é um material fibroso – é o subproduto desse processo. Sendo suas fibras estáveis até os 200°C de temperatura (HOSSAIN *et al.*, 2014), à priori, seu uso se torna viável na pavimentação, uma vez que suportariam as altas temperaturas de produção das misturas asfálticas (135-177°C).

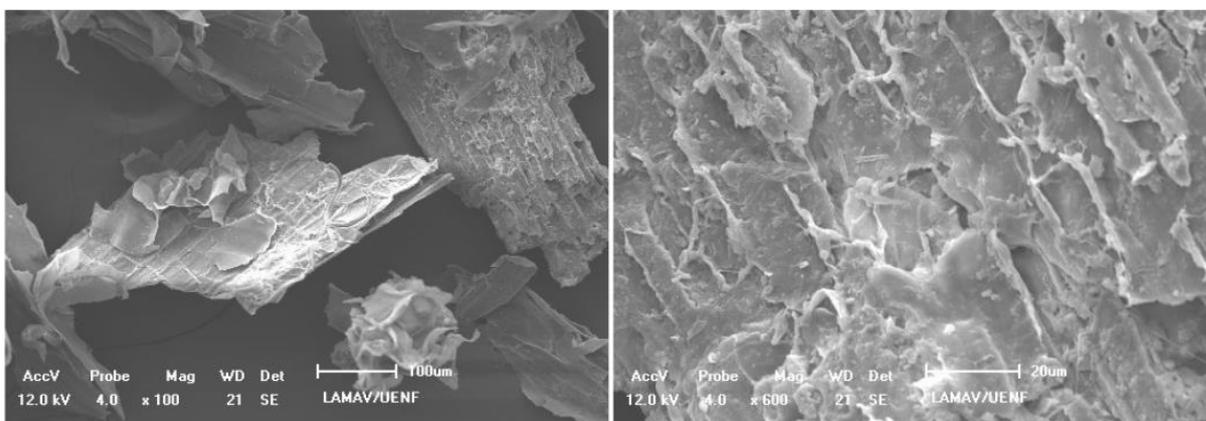
A composição química do bagaço é 1-4% de cinzas, 50-84% de holocelulose, 32-55% de celulose, 27-32% hemicelulose e 19-25% de lignina. O bagaço apresenta 27.1 GPa de módulo de elasticidade e 222 MPa de resistência à tração (GUIMARÃES *et al.*, 2009). Outros autores também estudaram a resistência mecânica das fibras de bagaço de cana-de-açúcar, como Hossain *et al.* (2014), que obtiveram $5,2 \pm 0,6$ GPa para o módulo de elasticidade e $169,5 \pm 18,7$ MPa para resistência à tração, e Motta *et al.* (2007) 3,6 GPa para módulo de elasticidade e 212,27 MPa para resistência à tração.

Geometricamente, as fibras do bagaço foram caracterizadas por Hossain *et al.* (2014), e os autores consideram o feixe como de formato cilíndrico, e de diâmetro médio de

0,26mm, enquanto Guimarães *et al.* (2009) apontam um diâmetro entre 0,07 e 0,31mm. Já Motta *et al.* (2007), obtiveram 0,24mm, e também verificaram a massa específica das fibras, obtendo o valor de 1,375g/cm³.

Com a realização de micrografia da superfície das fibras, através do uso de microscópio de varredura eletrônica, Leal (2013) identificou um formato propício para a aderência do ligante asfáltico às fibras do bagaço. Foi identificado um formato característico, com saliências e reentrâncias, além de formas reticuladas, como ilustra a Figura 15.

Figura 15 – Micrografia das fibras do bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Leal (2013).

As características de adsorção das fibras, intimamente relacionadas à área superficial específica do material, influenciam a capacidade das fibras de reter o ligante asfáltico, alterando seu comportamento, principalmente quanto ao escorrimento.

2.2.2 Fibras de Celulose

As fibras de celulose são produzidas a partir de resíduos de papéis e madeira, após seu processamento. Geralmente, são utilizadas na forma de pastilhas ou pellets, que são produzidos pela adição de ligante (betume, ceras ou óleos) às fibras, em proporções adequadas. Como resultado, as pastilhas apresentam entre 5 – 8mm de comprimento e 3 – 4mm de diâmetro (HOMEM, 2002). A Figura 16 ilustra a fibra celulósica em formato de pastilha.

Figura 16 – Fibra de Celulose em pellet



Fonte: JRS (2016).

A pelotização das fibras de celulose tem como objetivo facilitar a manipulação das fibras, através da homogeneização de formato, tamanho e tratamento das fibras. A adição de ligante betuminoso às fibras, garantem a dispersão das fibras durante o processo de produção da mistura asfáltica (DUMKE, 2005).

As fibras celulósicas conferem estabilidade à mistura, e atuam absorvendo o excesso de ligante, evitando o escorrimento e possibilitando o aumento no teor de ligante betuminoso em misturas asfálticas (WURST e PUTMAN, 2013).

Vale salientar, que o uso das fibras de celulose está difundido na pavimentação asfáltica, em geral. Em decorrência disso, as fibras encontram-se disponíveis comercialmente, já em formato de pellet. Exemplo disso, são os produtos VIATOP e TOPCEL, das fabricantes alemãs JRS e CFF, respectivamente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os métodos científicos necessários ao desenvolvimento da pesquisa, definindo as variáveis do problema bem como os ensaios para caracterização dos materiais utilizados e dos asfaltos porosos em estudo.

3.1 MATERIAIS E MATRIZ EXPERIMENTAL

Para a produção das misturas asfálticas, foram utilizados brita, pó de pedra, cimento asfáltico de petróleo e fibras naturais – de celulose e de bagaço de cana-de-açúcar.

O programa experimental é dividido em 4 etapas, conforme ilustra a Figura 17. Inicialmente, tem-se a coleta e caracterização de materiais, em seguida, parte-se para a obtenção do teor de ligante ótimo das misturas, que se dará em termos de escorrimento do ligante, resistência ao desgaste e índice de vazios, para cada tipo de mistura. Após a definição do teor de ligante, segue a usinagem das diferentes misturas: sem fibras, com fibras de celulose (CEL) e com fibras de bagaço de cana-de-açúcar (BCA). Por fim, realizam-se os ensaios para obtenção das propriedades mecânicas e permeabilidade.

Figura 17 – Organograma do programa experimental



Fonte: Autor.

3.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O CAP escolhido foi do tipo convencional, de classificação CAP 30/45, cedido pela Usina Serrabetume, localizada em Serra/ES região metropolitana de Vitória. As características do ligante asfáltico estão dispostas na Tabela 9, e são de origem de ensaios realizados pelo próprio distribuidor do material (REGAP). Mesmo a norma

ASTM D7175 (2015) exigindo outros ensaios em ligante virgem e envelhecidos para a correta classificação do grau de desempenho, uma análise preliminar, baseada apenas no ensaio de cisalhamento em ligante virgem, mostrou ser enquadrado como PG 64-X, como ilustra a Tabela 10.

Tabela 9 – Características do Ligante

CARACTERÍSTICAS	REFERÊNCIA	VALORES	UNID.
Penetração, 100g, 5s, 25°C	30 a 45	32	dmm
Ponto de Amolecimento	52 (mín)	54	°C
Viscosidade Brookfield a 135°C	374 (mín)	448	cp
Viscosidade Brookfield a 150°C	203 (mín)	223	cp
Viscosidade Brookfield a 177°C	76 a 285	79	cp
Temperatura de Mistura	-	160 °C	°C
Temperatura de Compactação	-	146 °C	°C
Densidade Relativa a 20/4°C	-	1,008	

Fonte: Refinaria Gabriel Passos (REGAP-PETROBRAS).

Tabela 10 – Resultados de ensaio de cisalhamento em ligante virgem conforme ASTM D7175

TEMP. (°C)	G*/senδ (KPa)		
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3
52	12,87	14,67	15,00
56	6,75	7,64	7,76
60	3,70	4,16	4,20
64	2,09	2,33	2,35
68	1,23	1,35	1,37
72	0,73	0,81	0,82
76	0,45	0,49	0,50

Fonte: Autor.

3.1.2 Agregado miúdo e graúdo

Os agregados virgens empregados são originários das pedreiras Rydien (miúdo) e Brasília (graúdo), localizadas na Grande Vitória - ES, que foram caracterizados, conforme os parâmetros da normativa de dosagem da mistura asfáltica.

O método de dosagem (ASTM D7064) exige que o desgaste dos agregados graúdos seja inferior a 30%, exigência igual a norma brasileira DNER-ME 383 (1999), e que o percentual de agregados de formato achatado e alongado não seja superior a 10%, respeitando a proporção de 5:1 da maior para a menor dimensão do agregado.

Identificar algumas propriedades físicas e mecânicas dos materiais, se faz necessário para identificar propriedades volumétricas dos corpos de prova, bem como verificar o

atendimento aos requisitos da norma de dosagem. Dessa forma, os ensaios realizados são apresentados, juntamente às normas aplicáveis:

- Resistência ao desgaste e impacto dos agregados graúdos, no equipamento Los Angeles – ASTM C131/C131M (2014).
- Massa específica real do agregado miúdo – DNER-ME 084 (1995).
- Massa específica aparente e Absorção do agregado graúdo – ASTM C127 (2015).

Na Tabela 11 são apresentados os resultados da caracterização realizada em laboratório dos agregados utilizados no trabalho.

Tabela 11 – Resumo da caracterização dos agregados utilizados

Característica	Método	Unid.	Brita 0	Pó de Pedra	Tolerância
Massa específica aparente	ASTM C127-15	g/cm ³	2,767	-	-
Massa específica real	DNER-ME 084-95	g/cm ³	-	2,837	-
Absorção	ASTM C127-15	%	1,05	-	-
Abrasão Los Angeles	ASTM C131-14	%	45,69	-	30%

Fonte: Autor.

Observa-se que a resistência à abrasão Los Angeles dos agregados graúdos utilizados não atende ao limite estabelecido pela norma de dosagem. A provável explicação para o limite estabelecido está no risco de quebra dos agregados do pavimento, que levaria à alteração na composição granulométrica.

Entretanto, agregados com baixa resistência à abrasão são uma deficiência característica da região da Grande Vitória e de municípios vizinhos. Em contato com profissionais (laboratoristas) da região, descobriu-se que britas com baixa perda por abrasão só seriam encontradas em estados vizinhos, como o de Minas Gerais. Certamente, a utilização de agregados de origem de outros estados inviabilizaria a execução de CPAs em solo capixaba, uma vez que os custos de produção se tornariam proibitivos.

Embora a norma americana estabeleça o limite para Desgaste e a norma brasileira possua o mesmo valor limite, há a observação na norma nacional quanto à possibilidade de utilização de agregados com valores superiores de desgaste Los

Angeles, desde que haja histórico de utilização anterior do material com desempenho satisfatório. Mesmo que não haja registros de utilização de CPAs no Espírito Santo, há registro de diversas obras de tratamentos superficiais simples (necessário Desgaste inferior a 40%) que apresentaram bom desempenho e durabilidade.

Dessa forma, o emprego dos agregados disponíveis no Estado objetiva verificar a viabilidade de emprego de CPA no Espírito Santo, com a particularidade dos agregados regionais.

3.1.3 Fibras

O material fibroso de bagaço é proveniente do resíduo de pequenos produtores de caldo de cana, da região metropolitana de Vitória. A utilização da fibra desempenha a função de adição para controle de escoamento na mistura porosa, e para tal, deve ter prévio tratamento para caracterização, antes da aplicação na pesquisa, visto que, após a coleta, há detritos variados impregnados no material, além da umidade natural remanescente da moagem da cana.

Inicialmente, o bagaço foi submetido à lavagem em água corrente, com limpeza manual com bucha, sem produtos químicos ou sabão. Em seguida, o material foi acondicionado em estufa à 100°C para secagem, durante 2h. Logo depois, o material foi cortado com comprimento variando entre 15 e 20mm, como ilustra a Figura 18, manualmente, com auxílio de tesoura comum. A adoção desse tamanho de fibras teve como base os melhores resultados para os ensaios de escoamento utilizando fibras maiores (<1,2mm) realizados por Leal (2013), se comparados aos resultados da utilização de fibras BCA menores (<0,6 e <0,3mm). Então, partiu-se para o processo de desfiar manualmente, transformando o material em filamentos fibrosos. Por fim, o material foi peneirado (Figura 19) na peneira de 1,2mm, com intuito de descartar o pó que se desprende do material e utilizar apenas a fibra no trabalho. A secagem em estufa está em consonância com o tratamento realizado por Leal (2013), apesar do autor ter utilizado fibras de menor comprimento em seu trabalho (<1,2mm).

Figura 18 – Corte do bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Autor.

Figura 19 – Peneiramento dos filamentos de bagaço

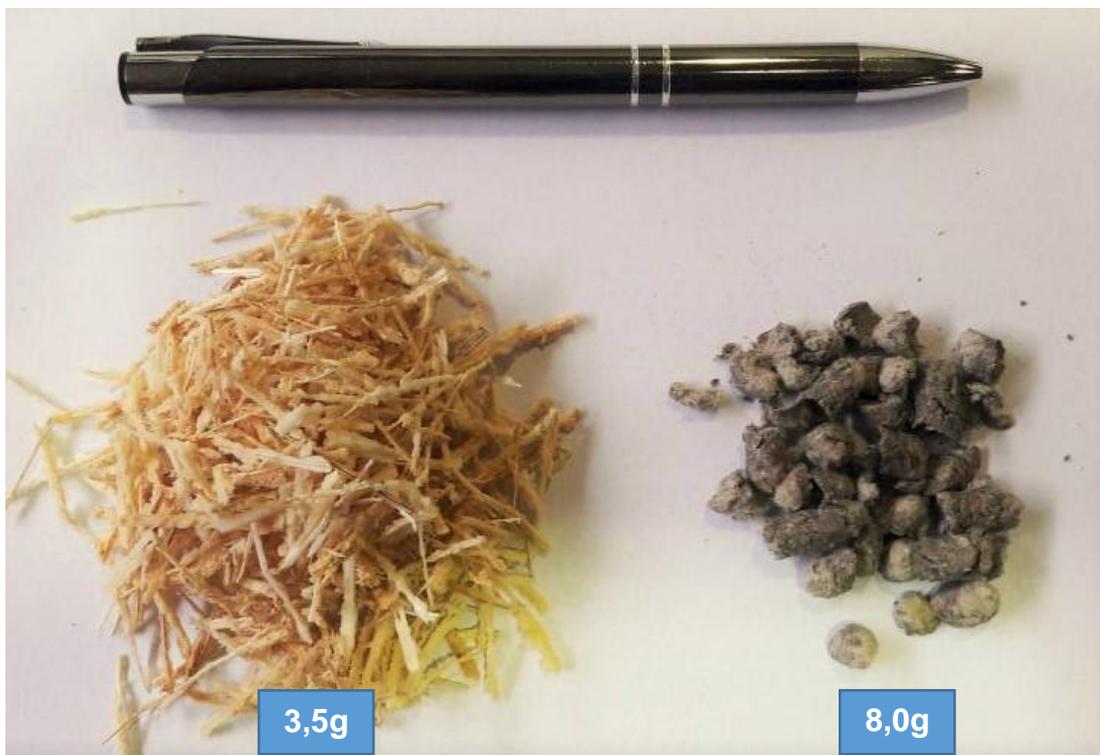


Fonte: Autor.

As fibras de celulose foram obtidas já industrializadas e no formato de pellets (celulose+asfalto) – modelo Topcel, importado da Alemanha (fabricante: CFF GmbH & Co. KG) –, cedidas pela Betunel Indústria e Comércio Ltda. As fibras utilizadas nesse trabalho estão ilustradas na Figura 20.

Como a norma de dosagem prevê a utilização de fibras como aditivo para estabilização da mistura, com percentual em massa variando entre 0,2 e 0,5%, inicialmente, planejou-se a utilização de ao menos dois diferentes percentuais de adição de fibras (0,3 e 0,5%). Entretanto, em misturas teste realizadas com as fibras de BCA, observou-se uma grande dificuldade na usinagem manual do material (única forma disponível para esse estudo). Como é possível notar na Figura 20, para atingir uma mesma massa que as fibras CEL, é necessário um volume muito maior de fibras BCA. Dessa forma, durante a usinagem das misturas BCA havia a dificuldade de se recobrir todas as fibras com ligante, levando à adoção de 0,3% de adição de fibras e o descarte do plano inicial de se variar o percentual de fibras das misturas estudadas.

Figura 20 – Fibras de BCA (esq.) e CEL (dir.)



Fonte: Autor.

Não se investigou a resistência à tração e módulo de elasticidade das fibras de celulose, pois fibras curtas não possuem função de reforço estrutural, e sim a função de estabilização da mistura. Já as fibras de BCA, por terem maiores dimensões, podem exercer a função de reforço nas misturas. Todavia, por limitações laboratoriais, considerou-se a resistência e módulo encontrados na bibliografia, como apresentados em 2.2.1.

Para melhor compreensão do efeito do tipo de fibra no desempenho da CPA, investigou-se as fibras quanto à (i) propriedades microestruturais por microscopia eletrônica de varredura e (ii) densidade.

3.1.3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O ensaio MEV foi realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, do Departamento de Física da Universidade Federal do Espírito Santo. O aparelho utilizado foi o Superscan SS-550, do fabricante Shimadzu.

Para o procedimento de análise microscópica das fibras, utilizou-se amostras representativas dos materiais para microscopia: as fibras BCA tiveram duas amostras, sendo uma de fibra de região mais próxima à casca do colmo (Região1) e outra de região mais interna do colmo, onde se concentra o caldo que é extraído da planta (Região2); já a fibra CEL teve sua camada mais externa desprezada, por conter material confinante que mantém o formato de pellet do material, analisando-se apenas amostras da região central do pellet, cujo material se assemelha com algodão. A Figura 21 ilustra as amostras de fibra de BCA (esq.) e CEL (dir.) antes da metalização (sup.) e após a etapa de metalização (inf.), procedimento necessário para evitar a acumulação de campos elétricos durante o ensaio e consequente danificação, realizada por cobertura de ouro.

Figura 21 – Preparação de amostras MEV: antes e após metalização

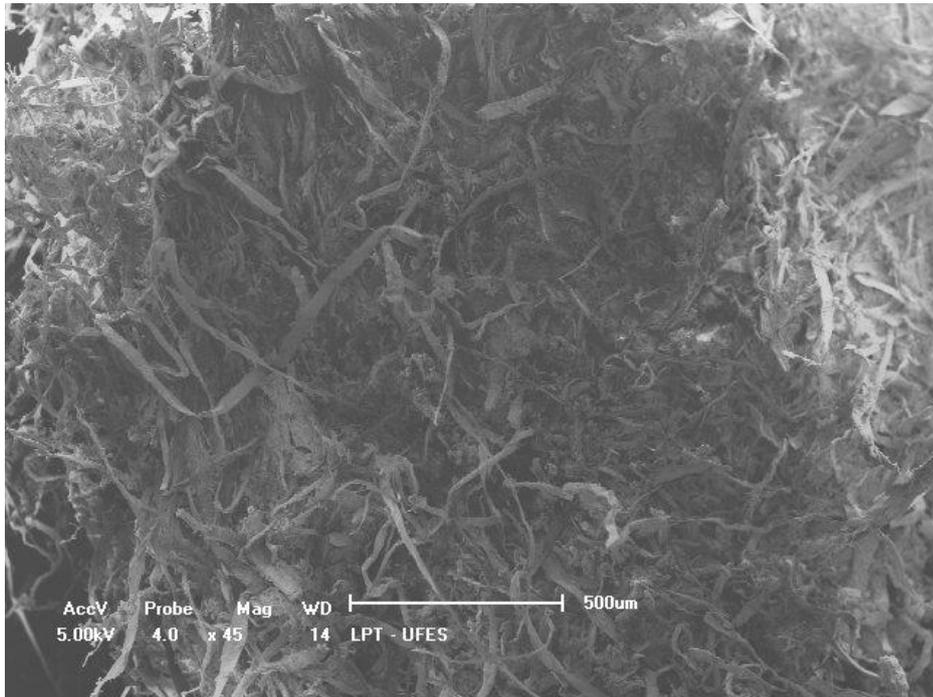


Fonte: Autor.

As imagens obtidas do ensaio revelam uma grande diferença nas dimensões das fibras de CEL e BCA, enquanto as fibras de bagaço apresentaram um diâmetro médio de $500\mu\text{m}$, as fibras de celulose não apresentaram constância em seu diâmetro, com valores variando entre 35 e $2\mu\text{m}$.

O pellet de celulose se caracteriza por ser formado por uma rede de filamentos fibrosos, que pela sua conformação indica uma boa capacidade de adsorver o ligante asfáltico, como ilustrado na Figura 22 com ampliação de $45\times$. Nota-se grande quantidade de fibras por área do pellet, que ao ser introduzido na mistura asfáltica, tende a ser separada e espalhada pelo interior da mistura asfáltica.

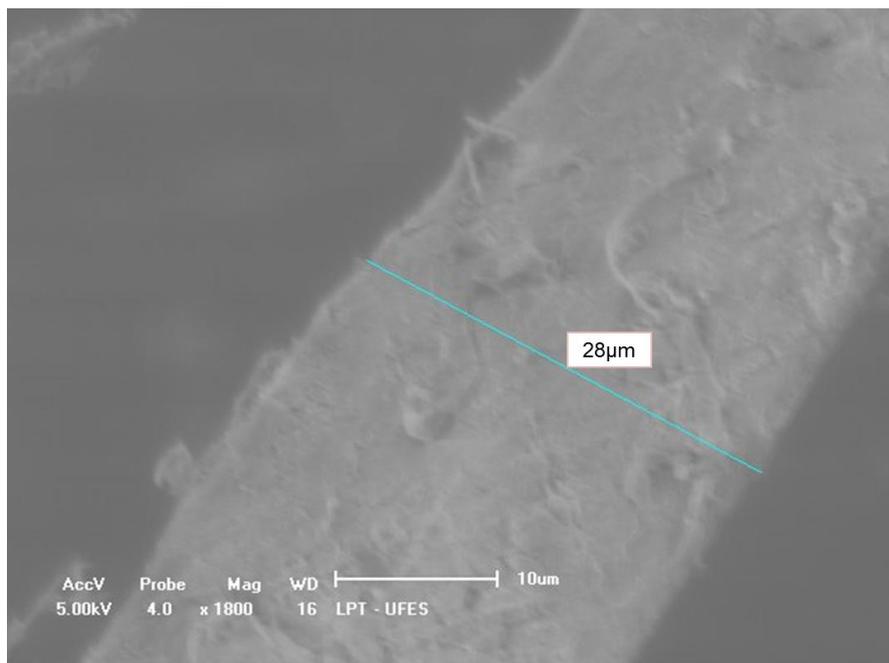
Figura 22 – Fibra de celulose por MEV 45x



Fonte: Autor.

Com maior ampliação na captura das imagens da celulose (Figura 23), observa-se uma superfície reticulada das fibras, o que tende a proporcionar melhor adsorção de ligante.

Figura 23 – MEV 1800x da fibra de celulose



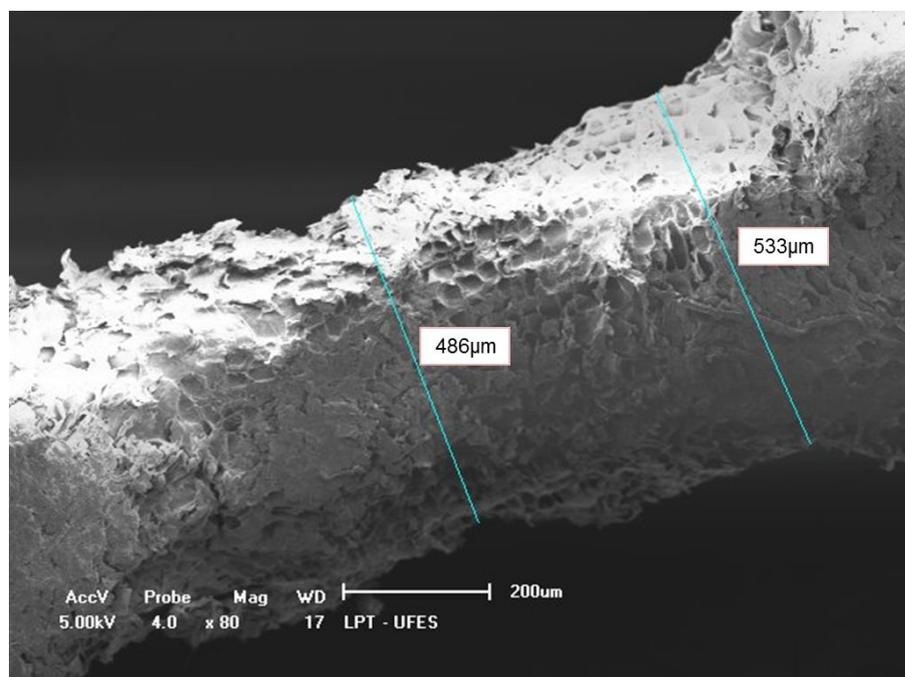
Fonte: Autor.

A análise por MEV das fibras de bagaço de cana permite classifica-las como macrofibras, devido ao maior diâmetro e comprimento do filamento, e essas acabam não formando uma rede com milhares de filamentos fibrosos. Todavia, é possível observar uma superfície reticulada da fibra (Figura 24), o que proporciona sua capacidade de adsorver o ligante asfáltico.

A comparação entre a fibra da Região1 (casca) e a Região2 (interior) de BCA levam a conclusão de que as fibras da casca têm a superfície mais lisa (Figura 24 e 25) do que as fibras do interior do colmo, fato esse que pôde ser notado a olho nu durante a manipulação do material. Esse comportamento menos rugoso leva a crer em uma menor capacidade de adsorver o CAP.

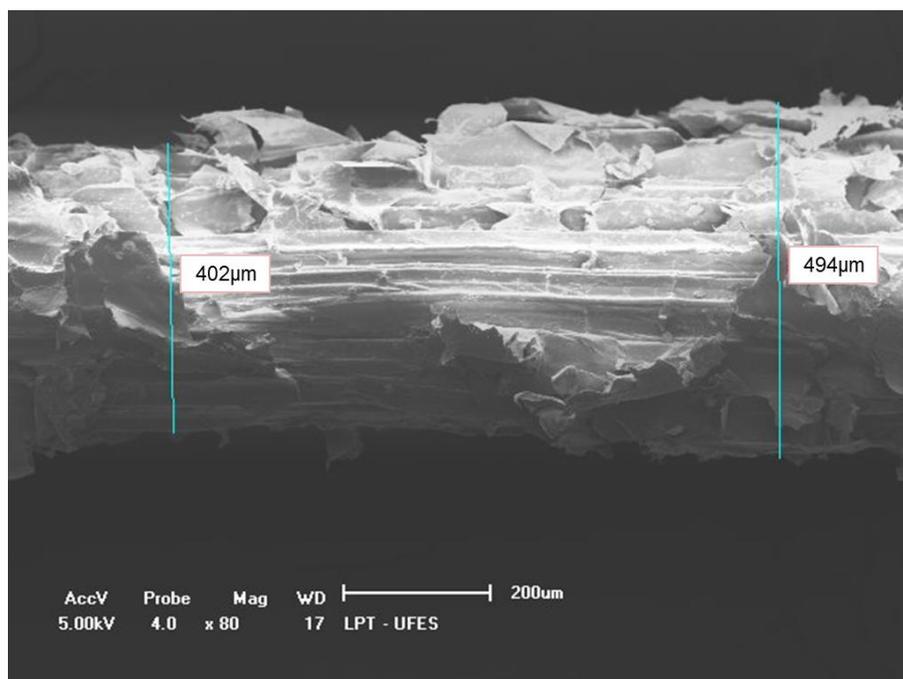
Adicionalmente, durante a manipulação do material, houve uma percepção de o material da casca parecer ser mais resistente à tração que as fibras do interior do colmo, mesmo sem ensaios para tal.

Figura 24 – MEV 80x BCA região2



Fonte: Autor.

Figura 25 – MEV 80x BCA região1



Fonte: Autor.

3.1.3.2 Massa Específica

Para verificação da massa específica, e sua influência na utilização das fibras, foi realizada a verificação de massa específica real.

Para análise da massa específica real, utilizou-se o método do picnômetro, adaptado pela utilização de bomba de vácuo para retirada do ar das amostras, para evitar-se o risco de uma possível alteração das amostras pela temperatura do banho térmico. Os resultados apresentados para massa específica real média foram: BCA: 1,78g/cm³ e CEL: 1,91g/cm³.

Além de apresentar massa específica real menor que as fibras de celulose, o BCA, devido ao seu formato alongado, ocupa um volume maior dentro da mistura, se comparado aos pellets de celulose que são apresentados de maneira mais compacta. A Figura 20 ilustra a diferença de densidade aparente das fibras, com as fibras de BCA ocupando um volume maior que as de CEL, e pesando menos da metade do peso. O resumo da caracterização das fibras utilizadas nesse trabalho é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Resumo da caracterização das fibras utilizados

CARACTERÍSTICA	BCA	CEL	Referências BCA
Comprimento	15 a 20mm	5-8mm ⁽⁴⁾	<1,2mm ⁽⁵⁾
Diâmetro	500µm	35 a 2µm	0,07-0,31mm ⁽¹⁾ ; 0,26mm ⁽²⁾ ; 0,24mm ⁽³⁾
Massa específica Real	1,78g/cm ³	1,91g/cm ³	-
Resistência à Tração (MPa)	222 ⁽¹⁾ ; 170 ⁽²⁾ ; 212 ⁽³⁾	-	-
Módulo Elasticidade (GPa)	27,1 ⁽¹⁾ ; 5,2 ⁽²⁾ ; 3,6 ⁽³⁾	-	-

(1) - Guimarães *et al.*, 2009; (2) - Hossain *et al.* (2014); (3) - Motta *et al.* (2007); (4) – Homem (2002); (5) – Leal (2013);

Fonte: Autor.

3.2 DOSAGEM

Para a usinagem de amostras de CPA, as proporções entre os materiais componentes precisam ser definidas através da dosagem. O método de dosagem é o previsto pela norma ASTM D7064 (2013). No entanto, apesar deste método especificar o uso de compactador giratório Superpave (CGS) como referência, foi adotado nesta pesquisa o método de compactação por impacto utilizando o compactador Marshall, dada as limitações de equipamento existentes. Além disso, buscou-se verificar a eficácia de se utilizar a compactação por impacto na dosagem deste tipo de mistura, uma vez que facilitaria a implementação da metodologia dentro do setor rodoviário brasileiro.

O emprego de compactação Marshall, em corpos de prova de CPA, é utilizado por alguns autores, como Frigio *et al.* (2013) em ensaio de desgaste Cantabro, assim como é previsto na norma brasileira DNER-ME 383 (1999), para controle das características da mistura durante a execução dos pavimentos porosos.

A energia de compactação adotada é de 30 golpes em cada face, tendo como referência o trabalho de Xu *et al.* (2016), embora vários autores utilizem 50 golpes. Os autores avaliaram a influência da temperatura de compactação e número de golpes do compactador Marshall em importantes parâmetros da mistura: índice de vazios, estabilidade Marshall e desgaste (Cântabro). Os autores sugerem que o número de golpes na compactação deve ser reduzido, para evitar a quebra dos agregados da mistura. O resultado do estudo aponta para o cumprimento dos critérios definidos por norma, para os parâmetros analisados, com adoção de uma temperatura de 145 ± 5 °C para compactação e 30 golpes em cada face do corpo de prova. A temperatura de compactação influencia de maneira mais significativa o índice de vazios, estabilidade

e desgaste, do que o número de golpes. Todavia, como o ligante adotado pelos autores apresenta desempenho diferente do ligante adotado no presente trabalho, a temperatura de compactação será de, conforme os dados de viscosidade obtidos pelo distribuidor do ligante, 146 ± 3 °C.

Após a seleção dos materiais, parte-se para a definição da faixa granulométrica a ser utilizada. Foi escolhida a faixa utilizada pelo estado do Arizona-EUA (ASTM D7064), conforme disposta na Tabela 13. Tal escolha se baseia na busca por um clima do estado americano, que se assemelhe com boa parte dos estados brasileiros, além de utilizar faixas sugeridas pela norma de dosagem. Phoenix, no Arizona, se caracteriza por ter regimes de chuva bem definidos e temperaturas usualmente elevadas no verão, com médias anuais de 23,4°C, período avaliado de 1971-2000 (ARIZONA, 2016).

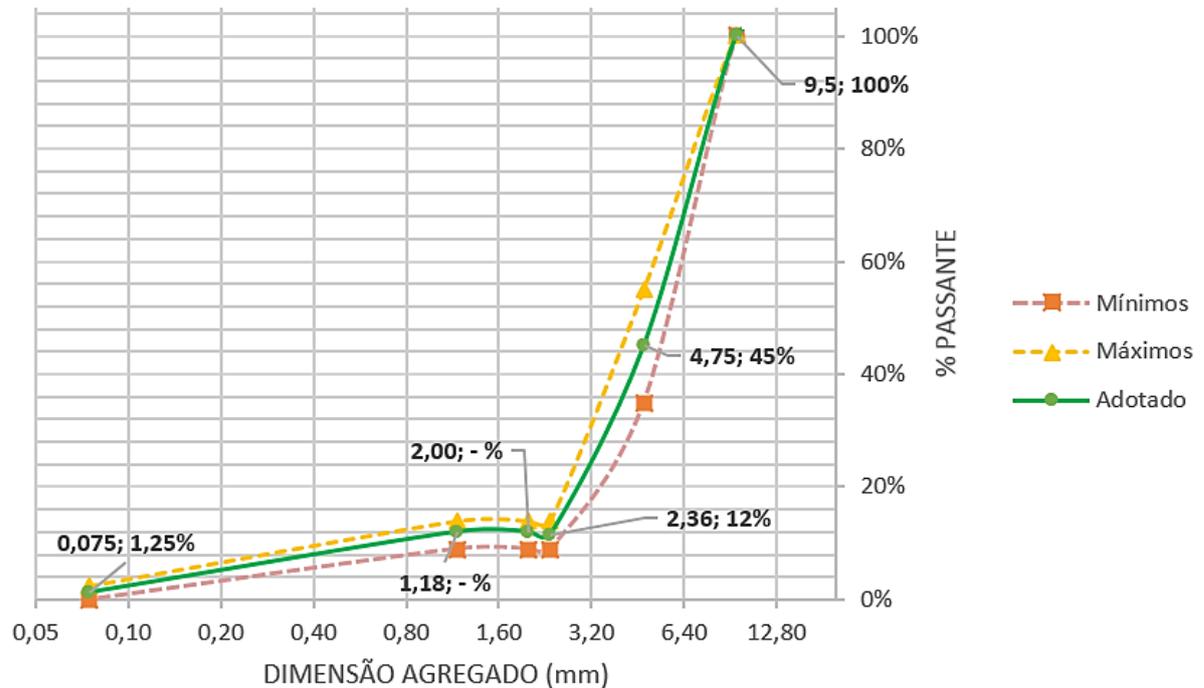
Tabela 13 – Faixa granulométrica utilizada

Faixa granulométrica Graduação (abertura)	% passante em massa		
	Min	Max	Utilizada
12.5 mm [1/2"]	100		100
9.5 mm [3/8"]	100		100
4.75 mm [No. 4]	35	55	45
2.36mm[No.8]	9	14	12
2.00 mm [No. 10]	-	-	-
1.18 mm [No. 16]	-	-	-
0.075 mm [No. 200]	0	2,5	1,25

Fonte: ASTM D7064 (2013).

A granulometria adotada é a média dos limites inferiores e superiores da composição granulométrica do Arizona, e está apresentada na Figura 26 e Tabela 13. Importante a comparação da faixa escolhida, com a norma brasileira DNER-ES386/99, observando-se a não compatibilidade com nenhuma das cinco faixas granulométricas disponíveis na normativa nacional.

Figura 26 – Granulometria adotada



Fonte: Autor.

Para o estudo, três diferentes tipos de CPA foram produzidas, sendo uma sem fibras, para controle, e outras duas com fibras, sendo uma com fibras de celulose e outra com fibras de bagaço. Todavia, inicialmente foram produzidas apenas misturas com fibras de celulose para dosagem, visto a experiência já consolidada da utilização das fibras industrializadas de celulose, ou seja, produziu-se misturas com fibras de celulose para avaliar seu desempenho e, em seguida, verificar se os resultados de desempenho com as misturas com adição de fibras de bagaço seriam semelhantes – verificando o potencial de substituição da celulose por bagaço de cana.

De posse do teor de ligante de projeto para misturas com fibras de celulose, procedeu-se à compactação dos corpos de prova para os ensaios físicos e mecânicos, utilizando também a fibras de BCA e misturas sem fibras.

Para definição do teor ótimo de ligante asfáltico das misturas, produziu-se misturas com diferentes teores de ligante, com pelo menos 5 teores diferentes a partir de incrementos de 0,5%. A escolha do teor ótimo de ligante se deu pela análise e atendimento de dois critérios obrigatórios segundo a ASTM D7064:

- Índice de vazios superior a 18% - ensaio ASTM D3203 (2011).
- Escorrimento menor que 0,3% em massa - ensaio ASTM D6390 (2011).

Ainda, a norma ASTM D7064 preconiza a análise opcional de desgaste Cantabro, que foi adotada na pesquisa, com atenção aos limites: para misturas não envelhecidas, o desgaste médio não pode ultrapassar 20%, e 30% para misturas envelhecidas; para nenhuma amostra individual o desgaste poderá ser superior a 50%.

Para determinação do índice de vazios, utilizou-se as diretrizes da norma ASTM D3203 (2011). Por se tratar de misturas abertas, inicialmente determina-se a densidade aparente da amostra compactada de formato regular, através de sua massa seca e volume. Em seguida, determina-se o peso específico máximo teórico, conforme a norma. O índice de vazios é dado pela equação:

$$V = 100 \times \left(1 - \frac{\rho_c}{\gamma_t} \right)$$

Onde:

ρ_c – massa específica aparente da amostra compactada, em g/cm³;

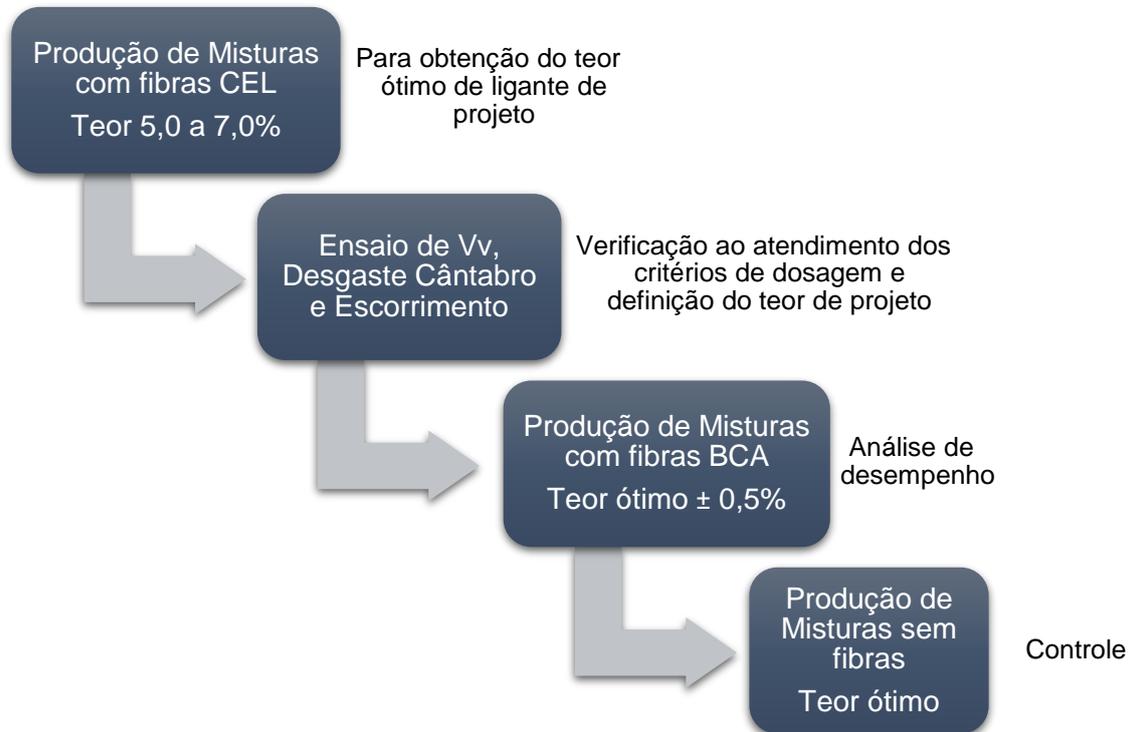
γ_t – massa específica máxima teórica da amostra, em g/cm³;

V – índice de vazios, em %.

Para a composição granulométrica adotada, a tabela X1.1 da ASTM D7064 (2013) sugere a adoção de teor de ligante asfáltico igual a 6,0%. Dessa maneira, inicialmente foram produzidas misturas com teor entre 5,0 e 7,0%, com incrementos de 0,5%, para análise de índice de vazios, escorrimento e resistência à abrasão Los Angeles, para determinação do teor ótimo de ligante asfáltico. Com os resultados obtidos para as misturas CEL, foram produzidas misturas tipo BCA no teor ótimo (encontrado para CEL) e duas misturas adicionais com teor de ligante variando em $\pm 0,5\%$. As misturas sem fibras, foram produzidas apenas com 5,5% (teor ótimo) de ligante encontrado para mistura CEL, para ensaio de permeabilidade e escorrimento.

O processo de dosagem está apresentado, de maneira condensada, sob o formato de um fluxograma, como ilustrado na Figura 27

Figura 27 – Processo de dosagem



Fonte: Autor.

Ainda, como a norma de dosagem ASTM D7064 (2013) requer a análise de determinados comportamentos da mistura após ter sido submetida à envelhecimento acelerado em laboratório, o processo de envelhecimento de longo prazo se deu por acondicionamento do CPs compactados em estufa à 60°C por 168h (7 dias), conforme a própria ASTM D7064 estabelece como forma de acelerar e simular o envelhecimento.

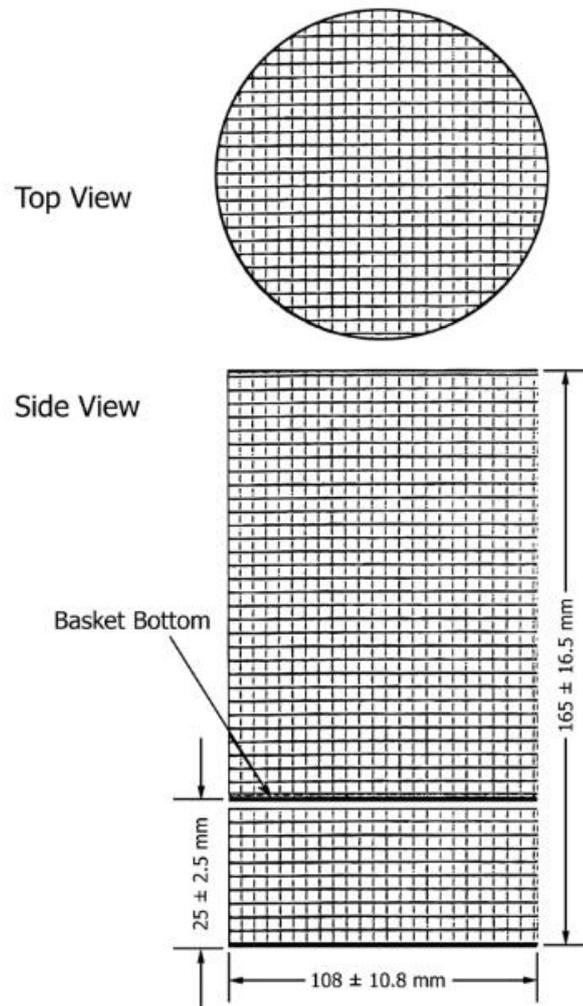
3.3 ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS

3.3.1 Ensaio de escorrimento de ligante betuminoso

O fenômeno de escorrimento é analisado, por alguns autores, através da análise da redução de permeabilidade, utilizando-se permeômetros (HAMZAH *et al.*, 2012, PUTMAN e LYONS, 2015). Entretanto, a ASTM define um procedimento específico para esse tipo de análise.

O ensaio seguiu a norma ASTM D6390 (2011). O ensaio utiliza a usinagem, sem compactação, de corpos de prova de $1200\text{g} \pm 200\text{g}$, que são inseridos em uma cesta de arames vazada de malha padrão 6,3mm, conforme Figura 28.

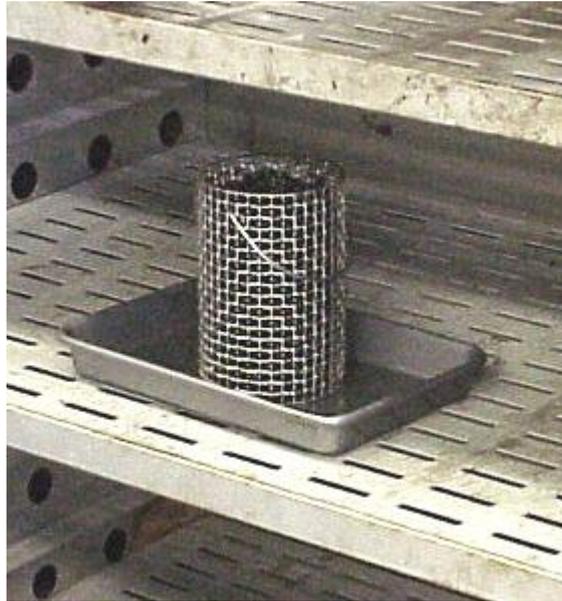
Figura 28 – Cesta de arames para ensaio de escorrimento



Fonte: ASTM D6390 (2011).

A cesta com a mistura é inserida em estufa por $1\text{ hora} \pm 5$ minutos, sobre uma vasilha ou prato, para que se possa recolher a argamassa asfáltica que irá escorrer da mistura, conforme ilustra a Figura 29. A temperatura do ensaio adotada foi igual a de usinagem da mistura ($160\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Figura 29 – Ensaio de escoimento de ligante asfáltico



Fonte: INDOT (2016).

O escoimento de ligante é dado por:

$$\text{Escoimento} = \frac{P_{es}}{P_t} \times 100$$

Onde:

Escoimento - %;

P_{es} – Massa de ligante que escoeu (massa final da vasilha menos a massa inicial);

P_t – Massa inicial total da amostra.

3.3.2 Desgaste Cântabro

Uma vez que a desagregação é uma das grandes preocupações no quesito durabilidade de pavimentos asfálticos porosos, diversos autores e países utilizam o ensaio Cantabro como parâmetro para a elaboração das misturas (ALVAREZ *et al.*, 2010).

O ensaio seguiu o disposto na norma DNER-ME 383/99 (1999), equivalente ao apêndice X2 (*THE CANTABRO ABRASION TEST*), da ASTM D7064 (2013). Para a análise da resistência à desagregação da mistura betuminosa, é utilizado o equipamento Los Angeles, sem esferas de aço (carga abrasiva). O equipamento deve

estar regulado para realizar 300 revoluções, a uma velocidade de 30-33 rotações por minuto.

O resultado do ensaio de desgaste, com aproximação de 1%, é dado em função da perda de massa da amostra, após as 300 revoluções, conforme a equação:

$$A = \frac{P - P'}{P} \times 100$$

Onde:

P – massa do corpo de prova Marshall antes do ensaio;

P' – massa do CP após o ensaio;

A – desgaste em %, com aproximação de 1%.

Para avaliação do desgaste, a norma de dosagem ASTM D7064 exige, ao menos, seis CPs para cada tipo de mistura asfáltica, sendo três deles ensaiados sem envelhecimento e os outros três CPs submetidos a envelhecimento acelerado em estufa antes dos ensaios.

3.3.3 Permeabilidade

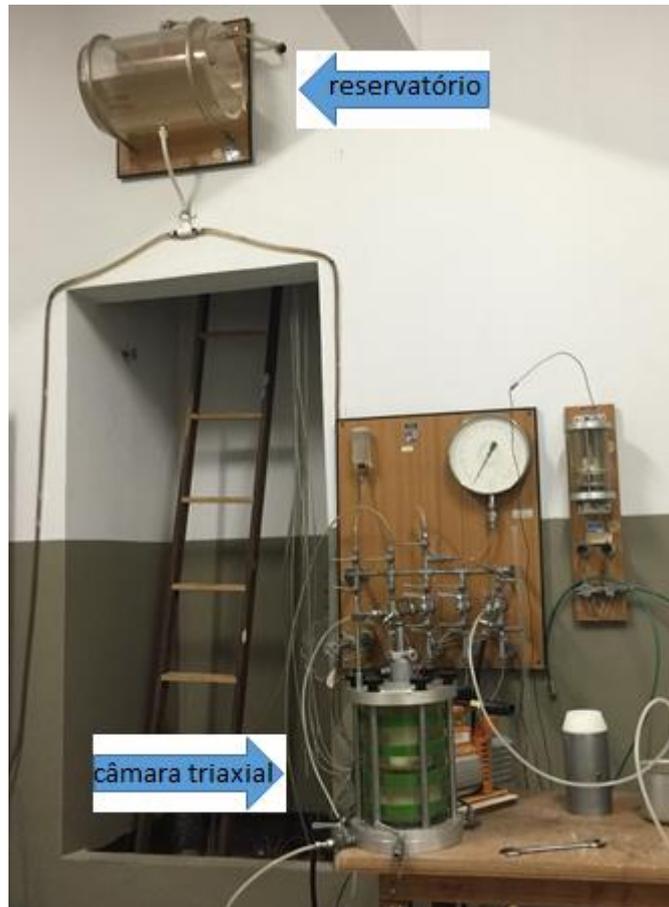
A investigação da condutividade hidráulica das misturas produzidas foi realizada através de um permeâmetro de paredes flexíveis, conforme previsto na ASTM D5084 (2016). A norma americana (ASTM D5084) é aplicada para materiais porosos em condição saturada, e apresenta resultados rápidos, estáveis e repetíveis, como verificado por Kanitpong *et al.* (2001).

O equipamento utilizado se encaixa na classificação de *constant head* da norma, ou seja, carga constante. Neste ensaio, o corpo de prova é inserido em uma câmara triaxial adaptada, cuja função é possibilitar a aplicação de tensão confinante sobre a membrana de borracha que envolve o CP, minimizando o fluxo lateral de água (entre a membrana e o CP) e garantindo a saturação do material.

Água destilada foi utilizada para a percolação do CP, atravessando-o de baixo para cima (fluxo ascensional). A pressão de percolação se dá através da diferença de nível do reservatório superior utilizado e a pressão confinante por coluna de mercúrio, e

foram adotadas, respectivamente, 2 e 10 mca (0,2 e 1 kgf/cm²). A Figura 30 mostra o equipamento do Laboratório de Geotecnia da UFES, utilizado para o ensaio.

Figura 30 – Permeâmetro de parede flexível



Fonte: autor.

A definição do coeficiente de permeabilidade se dá pela anotação (6 leituras por CP) da massa de água que percola o corpo de prova, por um intervalo de tempo (adotado 90s), para aplicação na equação:

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta h \cdot \Delta t}$$

Onde:

- k – permeabilidade, em m/s;
- Q – vazão de água, em m³;
- L – altura do corpo de prova, em m;

A – área da seção transversal do corpo de prova, em m²;
 Δh – carga média sobre o CP $((h_{inicial} + h_{final})/2)$, em mca;
 Δt – tempo aferido, em segundos.

O ensaio de permeabilidade foi realizado com CPs de 100mm de diâmetro e altura de 63,5mm, com 3 amostras para cada tipo de mistura (CEL e BCA), sendo 1 envelhecida, todas com o teor ótimo de ligante obtido da dosagem. Ainda, ensaiou-se 2 CPs sem fibras para verificação de possível alteração na permeabilidade por presença das fibras.

3.3.3.1 Vazios interconectados

Complementarmente, buscou-se investigar o percentual de vazios interconectados dos CPs de CPA para melhor compreensão dos resultados de permeabilidade. Para tal, utilizou-se como referência os trabalhos de Alvarez *et al.* (2009) e Wu *et al.* (2006), que são similares e utilizam a mesma teoria. Para se analisar o %vazios interconectados (V_i), deve-se compactar CPs e condicioná-los imersos em água por 6h, para então proceder a pesagem submersa das amostras. A obtenção do percentual de vazios interconectados se dá pela equação:

$$V_i = \left(1 - \frac{M_s - M_{sub}}{V \times \rho_w}\right) \times 100\%$$

Onde:

V_i – Vazios interconectados, em %;
 M_s – Massa seca do CP, em g;
 M_{sub} – Massa submersa do CP, em g;
 V – Volume do CP, em cm³;
 ρ_w – Densidade da água a 25°C, em g/cm³.

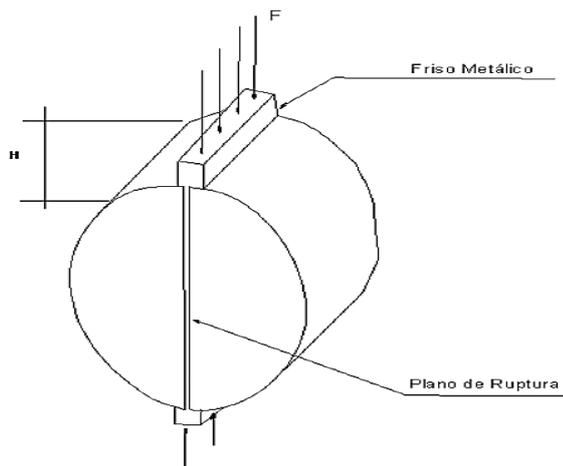
Como, segundo Alvarez *et al.* (2009), o V_i apresenta relação linear com V_v , a melhor análise para compreender a permeabilidade em termos de vazios interconectados é avaliar a relação V_i/V_v .

3.3.4 Resistência à tração – compressão diametral

O ensaio de resistência à tração, segue a normativa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, DNIT ME-136 (2010), que é equivalente à americana ASTM D6931 (2012). O ensaio utiliza a compressão diametral de um CP cilíndrico, de medidas 3,50 - 6,50cm (de acordo com o tamanho do friso utilizado) e 10cm ± 0,2cm, de altura e diâmetro, respectivamente.

O corpo de prova deve ser ensaiado à 25°C de temperatura, obtida através de estufa ou sistema de refrigeração, durante 2h. Após seu condicionamento, o CP é levado à prensa pneumática, e montado, de maneira que os pratos da prensa comprimam frisos metálicos, e estes comprimam o CP, conforme ilustra a Figura 31.

Figura 31 – Ensaio de compressão diametral



Fonte: DNIT ME-136 (2010).

A compressão é aplicada progressivamente, com uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que o CP se rompa. De posse da carga de ruptura (F), é possível se calcular a resistência à tração:

$$\sigma_r = \frac{2F}{\pi DH}$$

Onde:

σ_r - resistência à tração, em kgf/cm²;

F - carga de ruptura, em kgf;

D - diâmetro de corpo de prova, em cm;

H - altura do corpo de prova, em cm.

Para a análise de resistência à tração, foram ensaiados seis CPs para cada tipo de fibra: sendo três ensaiados sem envelhecimento e os outros três CPs submetidos a envelhecimento acelerado em estufa antes dos ensaios, dessa forma, totalizando 12 CPs.

3.3.5 Módulo de resiliência – compressão diametral

Embora, segundo Marques (2004), o módulo de resiliência possa ser obtido por vários tipos de ensaio de cargas repetidas, como tração uniaxial, compressão uniaxial, flexão em viga, tração diametral indireta e compressão triaxial, para o presente estudo, adotou-se o ensaio por compressão diametral por ser esse o modelo largamente utilizado no Brasil, principalmente em universidades (VASCONCELOS, 2004).

A busca pelo módulo de resiliência do corpo de prova asfáltico, associada aos resultados de Resistência à Tração (RT), é uma alternativa simples para se tentar compreender o comportamento das misturas, do ponto de vista de fadiga (balanço rigidez x flexibilidade). Uma vez que o Módulo de Resiliência (MR) por compressão diametral é dado pela relação entre a tensão de tração (σ_T) aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura asfáltica, e a deformação específica recuperável (ϵ_T), correspondente à tensão aplicada (DNIT ME-135, 2010) a uma dada temperatura. Seu valor representa o comportamento da mistura sob o ponto de vista de rigidez para carregamentos repetidos, que é a solicitação típica dos pavimentos. Todavia, os ensaios de fadiga não são facultativos, e sua realização apresenta valores mais precisos do comportamento das misturas asfálticas quanto à fadiga. Na impossibilidade da realização de tais ensaios, a análise de MR e RT pode contribuir para a compreensão do desempenho das misturas.

Ainda, é possível inferir que quanto menor o valor do MR, mais competente é o revestimento asfáltico em se recuperar de deformações (resiliência) por aplicação de cargas repetidas, ou seja, menos rígido. Cabe salientar que, para o bom desempenho de um pavimento, não basta analisar o MR. O desempenho quanto aos

carregamentos depende, dentre outros fatores, da capacidade de suporte da base do pavimento. Segundo Motta (1998, apud MARQUES, 2004), a determinação do MR é uma propriedade fundamental para se estimar a vida de fadiga de CPs asfálticos.

Quanto menor o valor de MR, reduz-se a absorção de tensões que levam a trincamento prematuro do revestimento, devido à menor rigidez. Ainda, maiores valores de RT são associados a uma maior resistência à fadiga. Dessa forma, quanto menor a relação MR/RT, melhor o comportamento frente à fadiga (BERNUCCI *et al.*, 2010). Dessa forma, é comum que autores analisem a relação MR/RT como uma forma de se estimar e comparar desempenhos (fadiga) de diferentes misturas asfálticas, entretanto, os ensaios de fadiga não devem ser dispensados.

Os ensaios de MR foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos Jaques de Medina da Coppe – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Os ensaios seguiram a normativa brasileira (DNIT-ME 135, 2010), cuja aparelhagem mínima necessária é, resumidamente:

- Prensa, dispendo de montantes, base e cabeça, calha de apoio e frisos para aplicação de carga;
- Sistema pneumático de carregamento capaz de aplicar carregamento vertical repetido;
- Sistema de medição da deformação diametral horizontal baseado em transdutores tipo *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT).

O procedimento do ensaio é descrito, resumidamente:

- Fixar ao CP o quadro suporte para instalação dos LVDTs ao longo do diâmetro horizontal do CP;
- Posicionar o CP na prensa sobre a base de suporte, sobre o friso inferior;
- Assentar o pistão de carregamento sobre o friso superior;
- Instalar os LVDTs;
- Condicionar o CP com aplicações de carga vertical repetida, sem que a tensão ultrapasse 30% da RT determinada previamente. Os carregamentos têm duração de 0,1s e frequência de 60 ciclos por minuto. A leitura dos deslocamentos recuperáveis é realizada em 5 ciclos de aplicação de carga.

- Calcular o MR, através da média dos módulos obtidos para 3 ciclos de aplicação de carga.

O cálculo do MR se dá pela equação:

$$MR = \frac{F}{100 \Delta H} (0,9976\mu + 0,2696)$$

Onde:

MR – módulo de resiliência, em MPa;

F – carga vertical repetida diametral, em N;

Δ – deslocamento resiliente, para aplicações de F, em cm;

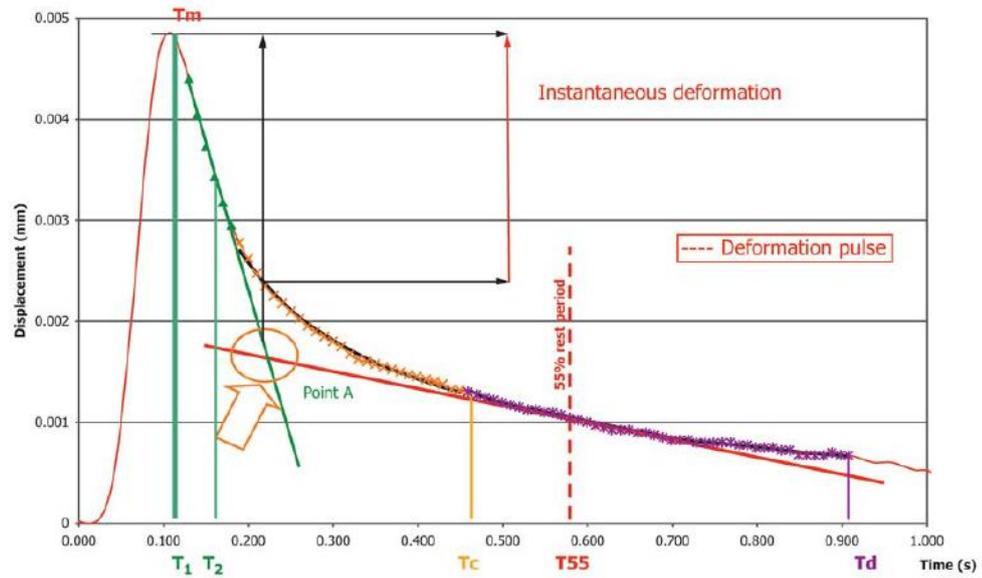
H – altura do corpo de prova, em cm;

μ – coeficiente de Poisson, fixado em 0,30.

O ensaio de MR no Brasil pode seguir duas normativas, a americana (ASTM D7369, 2011) ou a brasileira (DNIT-ME 135, 2010). O método de ensaio brasileiro de 2010, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), é a revisão da norma DNER-ME 133 (1994). Observa-se que as principais diferenças da revisão são (i) retirada do procedimento de condicionamento do CP, anterior às leituras das deformações que são utilizadas para cálculo do módulo, (ii) ausência da frequência do ciclo de carregamento e duração da aplicação da carga e (iii) ausência da fixação em 300, 400 e 500 aplicações de cargas para a leitura dos oscilógrafos e cálculo do MR como a média das 3 leituras. Ou seja, a normativa brasileira atual deixa livre a etapa de condicionamento e de aplicação dos carregamentos.

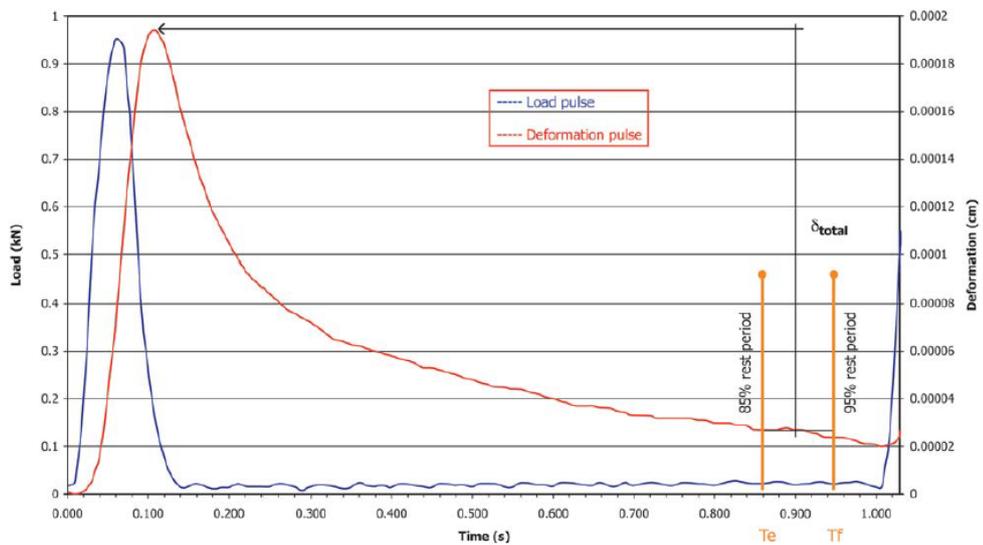
A norma americana é mais completa, e seus destaques estão em (i) especificar a etapa de pré-condicionamento através de 100 ciclos de carregamento, ou até que o módulo de resiliência fique estável (diferença máx. de 1% entre 5 ciclos após pré-condicionamento), (ii) fixar o valor da carga do ensaio entre 10 a 20% do valor da RT ensaiada previamente, (iii) fixar deformação vertical máxima durante o pré-condicionamento em 0,025mm, (iv) descrever o procedimento para cálculo do coeficiente de Poisson utilizado no cálculo do MR, (v) distinguir o MR total do MR instantâneo, ou seja, considerando a deformação recuperável instantânea após a aplicação da carga (Figura 32) ou considerando a deformação recuperável entre 85 e 95% do período de recuperação (*rest period*), dita deformação total (Figura 33).

Figura 32 – Deformação recuperável instantânea



Fonte: ASTM D7369 (2011).

Figura 33 – Deformação recuperável total



Fonte: ASTM D7369 (2011).

Para análise de MR foi adotada a mesma quantidade de CPs do ensaio de RT, seis CPs para cada tipo de fibra, sendo três ensaiados sem envelhecimento e os outros três CPs submetidos a envelhecimento acelerado em estufa antes dos ensaios, dessa forma, totalizando 12 CPs.

4. RESULTADOS

No presente capítulo, são apresentados os resultados dos parâmetros de dosagem e dos ensaios complementares propostos para este estudo. Embora exista uma correlação entre os resultados, estes serão apresentados na forma de tópicos, para melhor disposição dos dados.

4.1 DOSAGEM

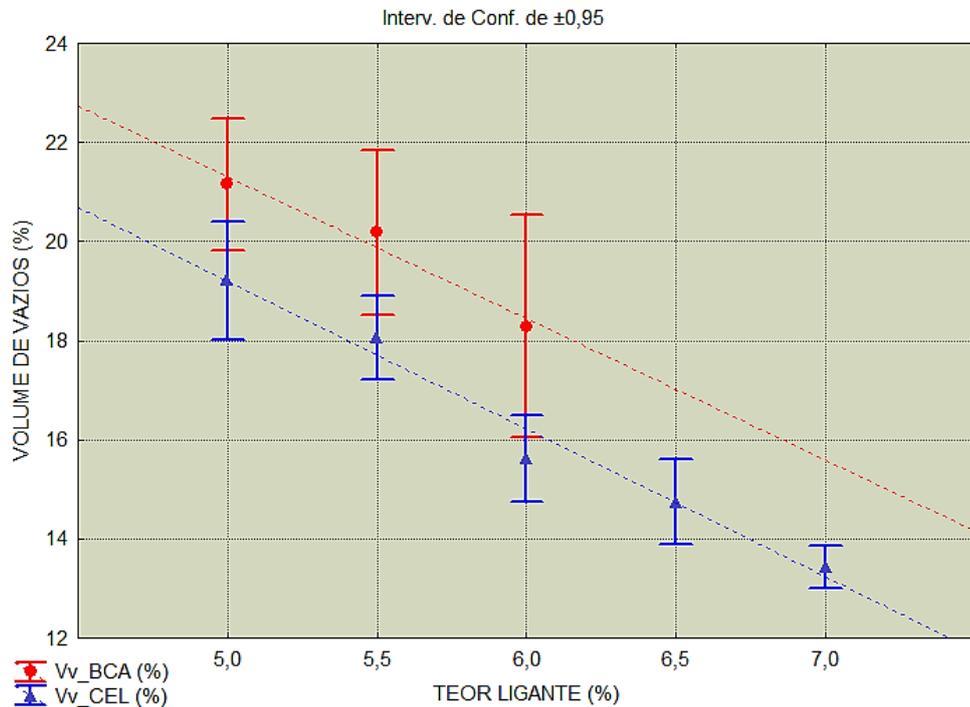
Como apresentado no capítulo 3.2, a dosagem de asfalto tipo CPA avalia o percentual de vazios e o escorrimento do ligante, obrigatoriamente. Ainda, como ensaio opcional apontado pela norma ASTM D7064, foi realizado o ensaio de desgaste Cântabro. Os resultados dos ensaios, bem como o teor ótimo de ligante utilizado são apresentados a seguir.

4.1.1 Índice de vazios

Para análise do índice de vazios, foram compactados CPs CEL com 5 teores de CAP diferentes, variando de 5,0 a 7,0 com incrementos de 0,5%. Em seguida, a partir dos resultados obtidos com as misturas CEL, compactou-se CPs BCA no teor ótimo encontrado para as misturas CEL e mais dois teores adicionais, variando $\pm 0,5\%$. Para cada teor de CAP adotado, foram analisados 6 CPs compactados para determinação dos parâmetros volumétricos, sendo 3 CPs submetidos a envelhecimento acelerado antes de serem ensaiados.

O resultado das análises volumétricas (com respectivos desvios padrões) dos CPs é expressa graficamente (Figura 34), e revela maiores índices de vazios das misturas BCA para um mesmo teor de ligante. Outra observação, é o decréscimo do volume de vazios (Vv) à medida que se aumenta o teor de ligante utilizado, consequência esperada.

Figura 34 – Percentual de vazios x Teor de ligante



Fonte: autor.

Para o atendimento da norma, apenas as misturas CEL com teores de ligante inferiores a 5,5% e BCA inferiores a 6,0% poderiam ser adotadas, visto que o Vv médio apresentado foi de 18,10 e 19,24%, respectivamente. Dessa forma, atender-se-ia o limite inferior de 18% preconizado pela norma de dosagem.

Da análise dos dados das misturas com fibra de celulose, foi possível ajustar um modelo estatístico entre teor de ligante e percentual de vazios da mistura compactada, de forte correlação ($R^2=0,8574$). O mesmo não pode ser feito com as misturas BCA, pois apresentaram grande dispersão, vide maiores intervalos de confiança. A equação que exprime o modelo estatístico das misturas CEL é dada por:

$$\%vazios = -298,23(\%CAP) + 34,108$$

Esse comportamento das misturas BCA pode ter sido influenciado pelo tamanho das fibras de bagaço – que são consideravelmente maiores que as de celulose –, além de possíveis problemas de distribuição das fibras de bagaço na mistura.

Os índices médios de vazios dos CPs compactados são resumidos na Tabela 14.

Tabela 14 – Volume de vazios médio x teor de ligante

MISTURA	CAP (%)	Vv (%)
CEL	5,00%	19,2
CEL	5,50%	18,4
CEL	6,00%	15,6
CEL	6,50%	14,7
CEL	7,00%	13,4
BCA	5,00%	21,2
BCA	5,50%	20,2
BCA	6,00%	19,2

Fonte: autor.

O maior teor de vazios para as misturas BCA pode ser explicado pela menor densidade das fibras de bagaço. Desse fato, o processo de dosagem demanda um maior quantitativo em volume de fibras de bagaço (0,3% em massa), volume esse que ocupa espaço dentro dos CPs asfálticos, que poderiam estar preenchidos pelos agregados e pelo ligante. Ou seja, para dois CPs de volume idêntico, tem-se menos agregados e CAP para as misturas BCA do que para as misturas CEL.

4.1.2 Ensaio de escorrimento de ligante betuminoso

Os percentuais em massa de escorrimento de ligante obtidos estão dispostos na Tabela 15.

Tabela 15 – Percentual de escorrimento de ligante asfáltico

	TEOR DE CAP				
	5,00%	5,50%	6,00%	6,50%	7,00%
CEL	0,00	0,02	0,02	0,04	0,07
BCA	0,02	0,04	0,05	-	-
Sem fibras	-	0,06	-	-	-

Fonte: autor.

Nota-se valores para escorrimento muito abaixo do limite estabelecido por norma (0,3%). O mesmo comportamento foi observado por Shadman e Ziari (2017), que

obtiveram valores de escorrimento em misturas asfálticas porosas de 0,021 / 0,028 / 0,032 para teores de 5,5 / 6,0 / 6,5% de CAP, respectivamente. Ou seja, valores baixos dessa magnitude são normais, e revelam que a mistura não apresenta problemas com escorrimento.

Todavia, Shadman e Ziari (2017) utilizaram ligante modificado por polímero SBS à 4%, que sabidamente são competentes no combate ao escorrimento. Como o presente estudo utiliza ligante convencional, esse comportamento tem outra explicação.

O ligante utilizado na pesquisa poderia ter influenciado os resultados de escorrimento, pois, embora seja convencional, o valor obtido no ensaio de penetração é muito baixo (32 dmm). Todavia, um ensaio teste realizado com ligante convencional CAP 50/70 (5,5%), também não apresentou valores expressivos de escorrimento de ligante.

O estudo de Mallick *et al.* (2000) é conclusivo para a compreensão dos baixos valores de escorrimento encontrados. Como apresentado no capítulo 2.1.3, os autores estudaram a influência dos percentuais passantes na peneira #4,75mm no comportamento de misturas asfálticas porosas. Com ligante convencional PG 64-22, com ensaio realizado à 175°C, os valores de escorrimento foram 1,27 / 0,25 / 0,24 / 0,19%, para misturas com percentuais passantes na #4,75 de 15 / 25 / 30 / 40%, respectivamente. Isto é, conclui-se que quanto maior o percentual passante na #4,75, menor será o escorrimento, e como a composição granulométrica adotada no presente estudo utiliza passante na #4,75mm de 45%, o comportamento é razoável.

É possível notar que as fibras de celulose foram mais competentes que as fibras de bagaço de cana-de-açúcar em reduzir o escorrimento das misturas, pois para todos os teores de ligante comparados, houve menor percentual quando adotada a fibra de celulose. Todavia, ao se usar uma mistura sem fibras (CAP 5,5%), constatou-se a capacidade das fibras BCA na redução de escorrimento. Isto significa que, embora com menor capacidade que as fibras CEL, a fibra BCA também tem propriedades de redução de escorrimento, e podem ser utilizadas para tal.

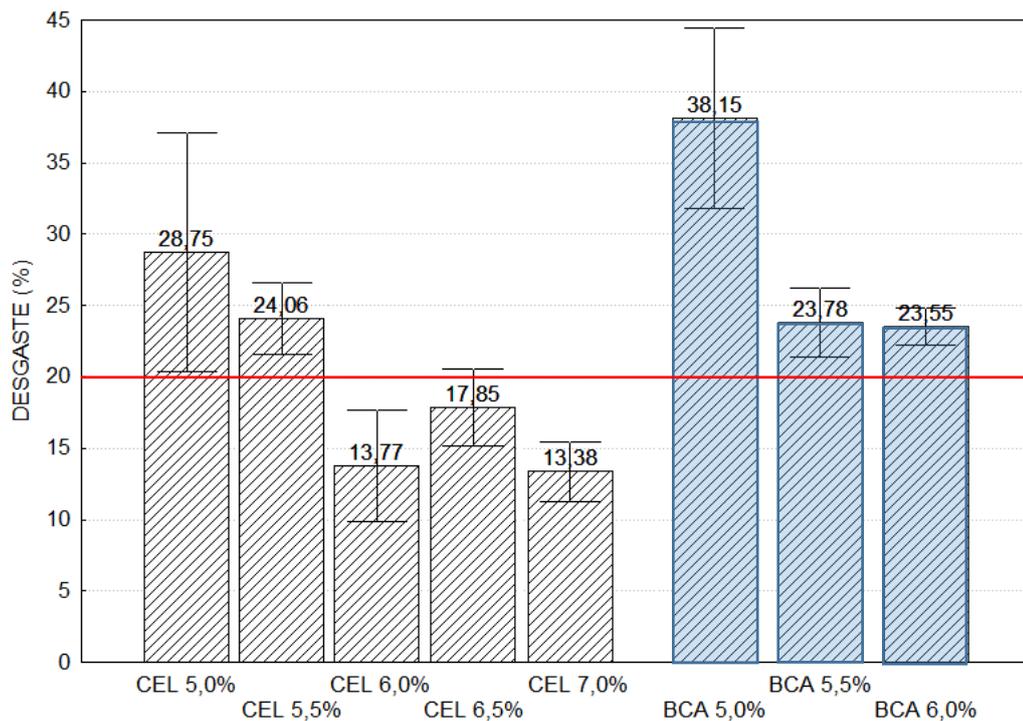
A diferença de desempenho entre as fibras era esperada e pode ser explicada pelas conclusões obtidas da micrografia das fibras. As fibras de celulose apresentam dimensões muito inferiores às de BCA, e por consequência formam uma rede filamentosa de milhares de fibras, indicando bom potencial para adsorção do ligante,

enquanto as fibras de BCA demonstraram apenas a capacidade de adsorção superficial de ligante.

4.1.3 Desgaste Cântabro

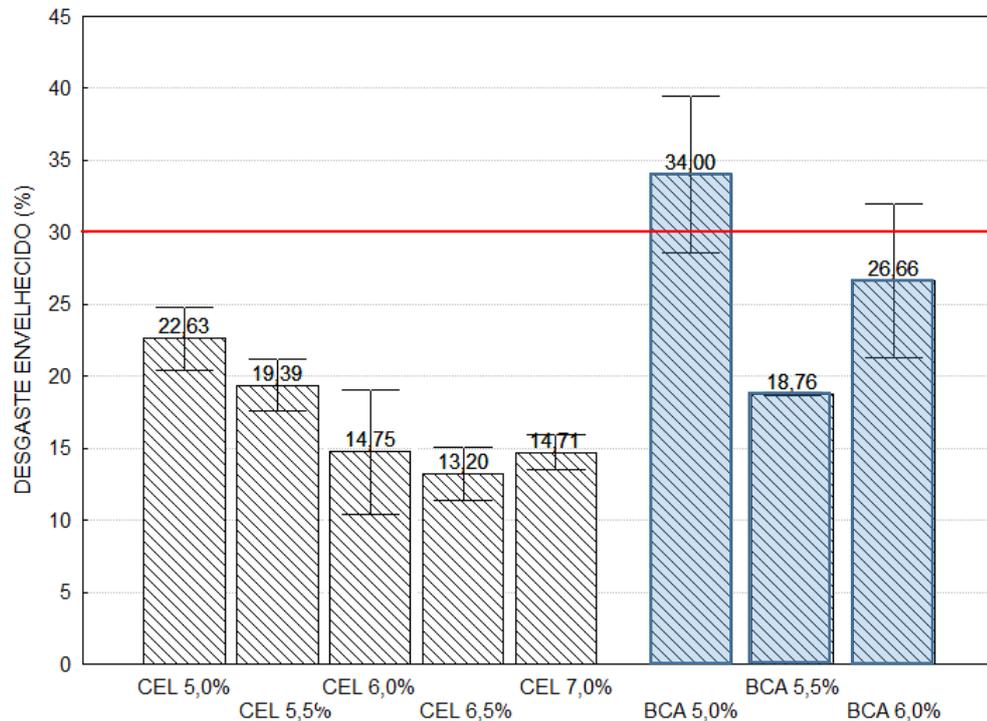
Os percentuais médios de perda de massa, devido ao ensaio de abrasão no equipamento Los Angeles, são apresentados graficamente resumidos nas Figura 35 e Figura 36, onde são apresentados o desgaste dos CPs que não foram e dos que foram submetidos ao processo de envelhecimento, respectivamente. Os gráficos são acompanhados do desvio padrão das médias de desgaste

Figura 35 – Percentual de desgaste à abrasão x teor de ligante



Fonte: autor.

Figura 36 – Percentual de desgaste à abrasão (envelhecido) x teor de ligante



Fonte: autor.

Quanto ao atendimento dos limites de desgaste preconizados pela norma de dosagem, das misturas envelhecidas, apenas a BCA_5,0% não atende o limite superior de 30%. Quanto às misturas sem envelhecimento, nenhuma das misturas com BCA atendem ao limite da norma, já as misturas CEL todas com teor de ligante superior à 6,0% conseguiram atingir valores inferiores ao limite da norma (20%).

É possível notar uma variação inesperada do comportamento de algumas misturas que não passaram por envelhecimento, que acabaram por apresentar um desgaste maior que as misturas envelhecidas. Apenas as misturas CEL_6,0%, CEL_7,0% e BCA_6,0% que apresentaram o comportamento esperado: maior desgaste para as misturas envelhecidas.

Como o comportamento dos resultados do ensaio de desgaste foi inesperado, buscou-se compreendê-lo estatisticamente: analisou-se o nível de significância do percentual de ligante e do processo de envelhecimento, sobre os valores de índice de vazios e desgaste, por análise de variância (ANOVA), utilizando o software Statistica 7.0 do fabricante Statsoft. Tanto para as misturas tipo CEL quanto para BCA, o nível de

significância do processo de envelhecimento é baixo, dado que os p-valores encontrados para as hipóteses são de 0,7687 e 0,9443 para CEL e BCA, respectivamente. Já o teor de ligante asfáltico, apresentou p-valores de 0,00000026 para CEL e 0,030 para BCA. Como a análise se deu para um intervalo de confiança de 95% ($\alpha=0,95$), conclui-se que apenas valores de p menores que 0,05 são significativos. A Figura 37 apresenta os resultados obtidos no software.

Figura 37 – Resultados ANOVA - software Statistica

Multivariate Tests of Significance BCA_Desgaste+Vv x (Teor+Envelhec)						
Sigma-restricted parameterization						
Effective hypothesis decomposition						
Effect	Test	Value	F	Effect df	Error df	p
Teor (%)	Wilks	0,368381	6,0010	2	7	0,0303416831
Envelhecimento	Wilks	0,983748	0,0578	2	7	0,9442655380
Teor (%)*Envelhecimento	Wilks	0,770608	1,0419	2	7	0,4017143563

Multivariate Tests of Significance (CEL_Desgaste+Vv) x (Teor+Envelhec)						
Sigma-restricted parameterization						
Effective hypothesis decomposition						
Effect	Test	Value	F	Effect df	Error df	p
Teor (%)	Wilks	0,042088	21,309	4	22	0,0000002640
Envelhecimento	Wilks	0,953303	0,269	2	11	0,7687220612
Teor (%)*Envelhecimento	Wilks	0,822149	0,566	4	22	0,6900411235

Fonte: autor.

Complementarmente à análise de variância, realizou-se uma regressão linear múltipla em vista de se analisar a correlação entre os percentuais de vazios e de desgaste, para ambas as misturas (CEL e BCA). Para as misturas tipo CEL, foi observada uma boa relação, com $R^2=0,746$, todavia para as misturas BCA, o volume de vazios não é um bom argumento para se compreender os resultados de desgaste ($R^2=0,289$). Os resultados são apresentados na Figura 38.

Figura 38 – Resultados regressão linear - software Statistica

Summary Statistics; DV: Vv x Desgaste BCA (%)	
Statistic	Value
Adjusted R ²	0,2886674530
F(1,16)	7,8988080482
p	0,0125665944
Std.Err. of Estimate	6,5367264031

Summary Statistics; DV: Vv x Desgaste CEL (%)	
Statistic	Value
Adjusted R ²	0,7455835463
F(1,28)	85,9863384613
p	0,0000000005
Std.Err. of Estimate	3,0728881699

Fonte: autor.

Os resultados das análises estatísticas revelam um comportamento para as misturas BCA dependente de outras variáveis que não foram apontadas na análise, visto que a correlação entre desgaste, teor de ligante e índice de vazios não é tão satisfatoriamente conclusiva, quanto observado nas misturas tipo CEL. Isto é, as misturas tipo BCA apresentaram maior variabilidade de comportamento para índice de vazios e desgaste cântabro.

Os resultados do ensaio de desgaste mostram um melhor desempenho para as misturas que utilizaram as fibras de celulose, à exceção das misturas que utilizaram 5,5% de CAP, que atingiram percentuais de desgaste semelhantes. Como o comportamento das misturas BCA não é tão previsível quanto o comportamento das misturas CEL, os fatores desconhecidos, que influenciaram as relações estatísticas dos parágrafos anteriores, devem ajudar a compreender o melhor desempenho quanto ao desgaste para as misturas CEL. Essa avaliação carece de mais pesquisas sobre o comportamento de misturas asfálticas porosas com adição de fibras de bagaço de cana-de-açúcar, e alguns possíveis fatores são: baixa resistência à abrasão dos agregados graúdos utilizados, diferenças na fabricação dos CPs devido à dificuldade do espalhamento das fibras de BCA da usinagem manual (como relatado no subcapítulo 3.1.3), dentre outros. Não foi objeto do presente trabalho, avançar além dos ensaios apontados no programa experimental. Todavia, é possível que tenham ocorrido falhas de homogeneização na distribuição das fibras de BCA nas misturas, com excesso de fibras em determinados pontos e ausência em outros. Uma análise,

que não pode ser realizada e que ajudaria essa compreensão, é a tomografia computadorizada de amostras de CPA com as fibras BCA e CEL.

4.1.4 Teor ótimo de CAP

A definição do teor ótimo de ligante asfáltico a ser adotado se deu em termos de volume de vazios e desgaste Cântabro, uma vez que os escorrimentos apresentados foram muito abaixo do limite estabelecido pela norma de dosagem. O percentual de CAP ótimo foi fixado em 5,5% em massa para ambos os tipos de mistura.

A escolha buscou priorizar menor teor possível de CAP com vistas a priorizar a economia e proporcionar vazios superiores a 18%, e embora tivesse que atender a todos os limites previstos pela norma de dosagem, sob o critério de desgaste à abrasão teve-se que admitir valores pouco superiores ao limite de 20% para misturas não envelhecidas. Tal exceção foi consentida em virtude dos valores para o desgaste de CPs envelhecidos para o teor ótimo terem sido inferiores ao limite de 30% e inclusive inferiores ao limite para os não envelhecidos. Ainda, verificou-se que os percentuais de desgaste encontrados respeitam o limite da norma brasileira DNER-ES386 (1999), que limita o desgaste em 25%. Caso a exceção não fosse admitida, nenhuma das misturas teria cumprido os requisitos de dosagem.

A Tabela 16 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de dosagem, indicando os valores em verde e vermelho para os resultados que respeitaram os limites por norma e os que não o fizeram, respectivamente.

Tabela 16 – Resumo dos resultados dos ensaios de dosagem

MISTURA	CAP (%)	Vv (%)	DESGASTE (%)	DESGASTE ENVELHECIDO (%)	ESCORRIMENTO (%)
CEL	5,00%	19,213	28,75	22,63	0,0016
CEL	5,50%	18,403	24,06	19,36	0,0229
CEL	6,00%	15,625	13,77	14,75	0,0204
CEL	6,50%	14,744	17,85	13,20	0,0388
CEL	7,00%	13,419	13,38	14,71	0,0662
BCA	5,00%	21,153	38,15	34,00	0,0177
BCA	5,50%	20,230	23,78	18,76	0,0444
BCA	6,00%	19,193	23,55	26,66	0,0485

Fonte: autor.

4.2 ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS

Neste subcapítulo são apresentados os resultados para os ensaios complementares aos mínimos exigidos para a dosagem.

4.2.1 Resistência à tração e Módulo de resiliência

Os valores médios de módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT) são apresentados na Tabela 17. Os resultados são acompanhados dos respectivos desvios padrões (s) – foram ensaiadas 3 amostras para cada tipo de mistura.

Tabela 17 – MR e RT

	MR (Mpa)	s - MR	RT (Mpa)	s - RT	MR/RT
BCA	4074	585	0,741	0,020	5496
BCA Envelhecido	5285	478	0,870	0,149	6076
CEL	5938	529	0,676	0,104	8784
CEL Envelhecido	6506	351	0,830	0,089	7843

Fonte: autor.

Dá análise dos resultados de RT, é possível constatar o aumento da resistência para os CPs que foram submetidos ao envelhecimento, uma consequência esperada do processo (BERNUCCI *et al.*, 2010), devido ao enrijecimento do ligante. Porém, outra consequência do enrijecimento é a diminuição da flexibilidade do revestimento asfáltico, que pode ser observada em termos do aumento dos valores de módulo de resiliência.

A presença das macrofibras de BCA foram responsáveis por um ligeiro aumento da RT, ou seja, indicando um potencial de reforço esperado para a fibra longa. Porém, esse resultado não foi estatisticamente relevante, dado que para uma análise de variância, RT x FIBRA, p-valor foi de 0,612, valor muito alto para efetivar uma correlação.

Da comparação dos valores de RT com outros trabalhos, é possível verificar que as misturas produzidas apresentaram boa resistência à tração. Por exemplo, analisando os resultados de Lyons e Putman (2013), verifica-se que para CPAs estudadas, com

ligante modificado por SBS e adição de fibras de celulose, obteve-se valores médios de RT de 0,462MPa.

Outra importante constatação, é o melhor comportamento quanto à fadiga das misturas que utilizaram fibras de bagaço, dado que os valores de MR foram inferiores aos valores encontrados para as misturas CEL, em ambos os casos, envelhecidos ou não. Esse resultado tem expressividade estatística, dado que do resultado de uma ANOVA MR x FIBRA, obteve-se p-valor de 0,007. Embora a utilização de macrofibras em misturas porosas não tenha muitos estudos disponíveis, a prática é bastante difundida para as misturas convencionais (granulometria fechada), e tem mostrado aumentar o desempenho das misturas quanto à fadiga (MAHREZ *et al.*, 2003; JAHROMI e KHODAII, 2008; YOO e KIM, 2015; DEHGHAN e MODARRES, 2017)

Por fim, ao se avaliar os valores de MR/RT, foi possível ratificar o melhor comportamento quanto à fadiga das misturas BCA, visto que apresentaram valores expressivamente menores que as CEL. Comparando-se os valores de MR/RT com outros autores que fizeram essa análise (Tabela 18), é notável a menor vida de fadiga frente a misturas convencionais, SMA e asfalto borracha via úmida e seca.

Tabela 18 – Valores referência para MR/RT

	MR/RT	MISTURA
Rede Asfalto (2005, apud BERNUCCI et al., 2010)	≤ 3510	Convencional – Faixa C (DNIT)
Vasconcelos (2004)	≤ 4844	SMA
Pinheiro (2004)	≤ 4786	Asfalto Borracha – Faixa C (DNIT)
Pinheiro (2004)	≤ 4102	CPA Asfalto Borracha – Faixa I (DNER)
Shirini e Imaninasab (2016)	7860	CPA Asfalto Borracha – via úmida
Shirini e Imaninasab (2016)	4350	CPA + ligante SBS
Shirini e Imaninasab (2016)	4280	CPA convencional

Fonte: autor.

Pinheiro (2004) avaliou misturas tipo CPA com incorporação de borracha via úmida (ligante modificado). Para misturas classificadas na FAIXA I da norma DNER 386/99, com teor de 6,0%, sem fibras, o processo úmido retornou valores de MR ≤ 1723 MPa e RT $\leq 0,45$ MPa, com consequente MR/RT ≤ 4102 . Ou seja, da utilização de ligante modificado por borracha de pneus, obteve-se menores valores de MR, indicando

melhor comportamento frente à fadiga, todavia os valores de RT foram mais baixos que os encontrados nas misturas do presente trabalho.

Em contrapartida, Shirini e Imaninasab (2016), avaliando os efeitos da adição de borracha moída de pneus em misturas tipo CPA com volume de vazios próximos de 18%, utilizando ligante PG58-22 à um teor de 5,3%, obtiveram os valores aproximados de MR/RT: 7860 para misturas com adição de 10% de borracha moída (%massa ligante; via úmida), 4350 para misturas com ligante modificado por SBS (5% em massa de ligante) e 4280 para misturas com ligante convencional.

Os resultados de MR e RT corroboram para a tendência de uma menor durabilidade da mistura CPA quanto à fadiga, uma vez que os valores de MR/RT são maiores que os valores comumente encontrados para outros tipos de misturas, como as convencionais e o SMA.

4.2.2 Ensaio de Permeabilidade

Os resultados para coeficiente de permeabilidade (k) foram, para ambas as misturas, de aproximadamente $1,21 \times 10^{-3}$ cm/s (valor muito baixo). Inicialmente, pensou-se que poderia haver alguma parte do método para o ensaio que estivesse influenciando no resultado, principalmente porque a média de k ficou igualmente baixa para BCA e CEL, não havendo diferença significativa entre as misturas. A Tabela 19 condensa alguns resultados de k (iniciais) citados nesse trabalho. Da análise dessa tabela, é possível ratificar que o valor obtido para a permeabilidade é insatisfatório.

Tabela 19 – Referências de coeficiente de permeabilidade

	k (cm/s)	Permeâmetro	Mistura	Vv (%)	Ligante	Fibras
ASTM D7064	0,116	-	CPA	> 18	-	-
Coleri <i>et al.</i> (2013)	0,15	Parede Rígida (carga var. ASTM C1701)	CPA	32,6	PG 64-10	-
Mallick <i>et al.</i> (2000)	0,135	Parede Rígida (carga var. - Florida DOT)	CPA	15,1	PG 64-22	-
Putman e Lyons (2015)	≈ 0,324	Parede Rígida (carga variável)	CPA	≈ 17	PG 76-22 + SBS	CEL (0,3%)
Hamzah <i>et al.</i> (2012)	0,134	Parede Rígida (carga variável)	CPA	-	60/70	-

Fonte: autor.

A primeira hipótese estava na possibilidade de as pedras porosas, que são empregadas no topo e fundo do CP para possibilitar o escoamento da água entre as placas de confinamento da amostra, estarem limitando o fluxo. Desse modo, experimentou-se substituir as placas porosas por geotêxtil utilizado em sistemas de drenagem de solos, por apresentam permeabilidade notadamente elevada. Os resultados obtidos não apresentaram alteração, descartando-se a hipótese inicial.

Outra questão que pode ter influenciado a permeabilidade das misturas é o processo de compactação por impacto. Os golpes no topo e fundo do CP podem ter proporcionado a impermeabilização das superfícies.

Se as amostras ensaiadas fossem solos, para os resultados de k , segundo Casagrande e Fadum (1940, apud COACALLA, 2012), seriam classificadas como um material de boa drenagem, similar a um solo composto de areia e pedregulhos limpos. Ou seja, existe algum potencial de permeabilidade, entretanto, segundo O'flaherty (2002, apud FERREIRA, 2015), para a classificação de misturas asfálticas, se encaixam como uma mistura de drenabilidade baixa. De fato, como os revestimentos asfálticos drenantes precisam retirar a água da superfície com muita rapidez, a classificação de permeabilidade dos solos figura apenas como ilustração da permeabilidade dos CPs ensaiados, embora apresentem baixo valor.

A norma brasileira de CPAs não especifica referências para o coeficiente de permeabilidade das misturas asfálticas, fator crucial para a funcionalidade desse tipo de revestimento. Contudo, a norma de dosagem americana especifica um valor mínimo de k , para misturas recém executadas, de 100m/dia, ou 0,1157cm/s. Como os resultados ficaram na ordem de 10^{-3} cm/s, ratifica-se a classificação como misturas de baixa drenagem.

O baixo desempenho quanto a permeabilidade pode ser melhor compreendido através do trabalho de Mallick *et al.* (2000), anteriormente citado no subcapítulo 2.1.3. Os autores ao variarem o percentual de agregados passantes na peneira #4,75mm, notaram forte relação entre o coeficiente de permeabilidade e a granulometria das misturas: quanto maior o percentual passante na #4,75, menor a permeabilidade. Os autores obtiveram o menor k (0,024cm/s) para a mistura com o maior percentual

passante estudada (40%). Como a mistura utilizada nesse estudo tem 45% passante na referida peneira, é plausível o baixo desempenho frente a permeabilidade.

No entanto, a análise de Mallick *et al.* (2000) mostrou que a redução do percentual passante na #4,75 leva a um aumento nos percentuais de escorrimento e de desgaste. Sob o ponto de vista de escorrimento, não há problemas em haver aumento do percentual, uma vez que os valores obtidos foram muito baixos. Contudo, frente ao desgaste, qualquer aumento no percentual levaria a um maior risco de desagregação da CPA, uma vez que os valores de desgaste obtidos ficaram muito próximos ao limite estabelecido por norma. Nota-se um ponto crítico da dosagem, em que ao se buscar maior permeabilidade, pode-se assumir um maior risco de desagregação. Essa questão, leva a conclusão de que seria necessária a substituição dos agregados utilizados (por de maior resistência à abrasão) ou do ligante asfáltico - por um de melhor desempenho, como os modificados por polímeros.

Como foi decidido que seria utilizada uma das faixas granulométricas constantes na ASTM D7064 (2013), houve maior preocupação com a melhor reprodução das condições climáticas do Brasil, frente ao estado escolhido. Após as conclusões obtidas da análise de k, observa-se que das composições granulométricas indicadas pela norma de dosagem (Tabela 2, subcapítulo 2.1.2), apenas a do estado da Flórida tem potencial de atingir bons resultados de permeabilidade, segundo o estudo de Mallick *et al.* (2000), pois é a única composição que admite %passante inferior a 20% na #4,75 (entre 10 e 40%). Dessa forma, cabe a crítica da necessidade de se reavaliar as granulometrias sugeridas na ASTM D7064 (2013).

Interessante citar que a normativa Brasileira DNER-ES 386/99 apresenta grande variação nos percentuais passantes para a peneira de abertura #4,8mm (equivalente à #4,75mm ASTM), com valores entre 15 e 50%, a depender da faixa granulométrica adotada. Se forem consideradas as médias dos limites inferiores e superiores (mesma linha adotada nesse trabalho), a média do %passante na #4,8mm das cinco faixas granulométricas disponíveis seria de 30%. A adoção de alguma das faixas brasileiras, à exceção da faixa III, pelo concluído por Mallick *et al.* (2000), tenderia a proporcionar misturas com maior coeficiente de permeabilidade do que o obtido nesse trabalho.

Quanto ao efeito em k devido à presença de fibras na mistura, não há diferença significativa entre a utilização de fibras de celulose ou de bagaço de cana.

Aparentemente, o resultado da permeabilidade não foi tão influenciado pela presença ou não de fibras, e sim pela composição granulométrica. Todavia, como foram usinadas mistura sem fibras, exclusivamente para o ensaio de permeabilidade, observou-se leve aumento no coeficiente de permeabilidade ($k=1,33 \times 10^{-5} \text{m/s}$), mesmo para misturas com percentual de vazios muito menores que as que continham fibras – com fibras 19,6% e sem fibras 14,3%. Tal constatação leva à necessidade de se analisar o percentual de vazios interconectados das misturas.

4.2.2.1 Vazios interconectados

Para as misturas com fibras de BCA e CEL (0,3%), a um teor de 5,5% de ligante asfáltico, a média da relação V_i/V_v foi de 0,525, não havendo diferença significativa entre misturas BCA e CEL. Isto é, o percentual médio de vazios que realmente conduzem água no interior da mistura é de 52,5% do percentual de vazios totais. Dessa forma, tem-se mais uma justificativa para o baixo desempenho frente à permeabilidade das misturas estudadas, que apesar de terem V_v satisfatórios (>18%), não possuem boa interconexão entre os vazios.

Wu *et al.* (2006) obteve, para misturas com 5,5% de ligante, valores de aproximadamente 71% e 66% para o percentual de vazios que conduzem água. Já os resultados de Alvarez *et al.* (2009) apresentaram valores, em média, sempre superiores a 70%. A comparação entre esses valores revela a deficiência de comunicação entre os vazios das misturas CEL e BCA, com grande presença de vazios aprisionados não comunicantes.

Embora não tenham sido avaliados os Vazios Interconectados das misturas sem fibras, ao se observar sua maior permeabilidade (comparada a BCA e CEL), mesmo apresentando menor V_v do que as misturas com fibras (14,3%), evidencia-se a possibilidade de redução da interconectividade entre os vazios da mistura por conta da presença de fibras, sendo essa a mesma conclusão de Chen *et al.* (2013).

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

O emprego de fibras de bagaço de cana-de-açúcar se mostrou promissor em misturas asfálticas porosas, todavia mais investigações são necessárias. As seguintes conclusões e sugestões são importantes para uma possível continuidade da pesquisa:

- Análises de desempenho de misturas porosas devem sempre ser acompanhadas de verificações de permeabilidade das misturas. Verificou-se uma estreita relação inversa entre resistência ao desgaste e escorrimento, frente à permeabilidade das misturas.
- Sugere-se a avaliação de permeabilidade de corpos de prova em outras direções, como a permeabilidade lateral, como medida de avaliação de possível efeito de impermeabilização das superfícies do topo e fundo do CP após compactação por impacto.
- Assim como concluído por Mallick *et al.* (2000), sugere-se que o percentual passante na peneira #4,75mm esteja próximo de 15%.
- A tabela de composições granulométricas, sugerida pela ASTM D7064-13, utilizadas por alguns estados americanos, pode não ser a melhor sugestão para a composição, uma vez que, apenas para o estado da Flórida é admitido um %passante na #4,75 inferior a 20%. Desse modo, há a necessidade de se reavaliar tais granulometrias sugeridas.
- O uso de agregados com baixa resistência à abrasão não é indicado, como estabelecido pela norma americana de dosagem. Essa condição leva à necessidade de maior teor de ligante e de granulometria menos aberta para atendimento do limite de desgaste da mistura. No entanto, levará a redução da permeabilidade da mistura.
- A presença de fibras leva a redução da permeabilidade das misturas, devido à diminuição da interconexão entre os canais de vazios no interior do revestimento asfáltico.
- A cana-de-açúcar, por ser um material natural, pode apresentar grande variabilidade nas características físicas e mecânicas de suas fibras, tendo em vista a grande variabilidade de espécies. Desse modo, sugere-se uma análise mais aprofundada de diferentes amostras de bagaço de cana-de-açúcar, e

verificação da repetibilidade das características do material, avançando, inclusive, com as análises por microscopia eletrônica de varredura.

- Em CPAs, a utilização de ligante convencional e adição de fibras, tem se revelado mais desafiadora que a utilização de ligantes modificados por polímero sem fibras. Vários estudos apontam o bom desempenho quanto à fadiga, deformação permanente, desagregação e permeabilidade para misturas que adotaram apenas ligante modificado por polímero.
- Sugere-se, para futuros estudos, a análise de desempenho de misturas asfálticas porosas tipo CPA com adição de diferentes tipos de fibras (naturais ou industrializadas) através de Modelagem Computacional Microestrutural, de modo a investigar a influência das características geométricas de agregados e fibras no comportamento das misturas.
- Sugere-se o estudo de misturas CPA acompanhados da construção de trechos experimentais, de modo a se investigar a eficiência da tecnologia nas condições brasileiras.
- Outra sugestão de estudo, que foi um dos desejos iniciais do autor, embora fora do tema do trabalho desenvolvido, é o estudo da dosagem de misturas asfálticas tipo CPA com adição de agregados oriundos do processo de fresagem de concretos asfálticos convencionais (não porosos) – agregados reciclados.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ, A. E.; EPPS-MARTIN, A.; ESTAKHRI, C. Connected air voids content in permeable friction course mixtures. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 37, n. 3, p. 254-263, 2009.

ALVAREZ, A. E.; EPPS-MARTIN, A.; ESTAKHRI, C., IZZO, R. Evaluation of durability tests for permeable friction course mixtures. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 11, n. 1, p. 49–60, 2010.

ALVAREZ-LUGO, A. E.; REYES-ORTIZ, O. J.; MIRÓ, R. A review of the characterization and evaluation of permeable friction course mixtures. **Ingeniare. Revista chilena de ingeniería**, v. 22, n. 4, p. 469-482, 2014.

ARIZONA STATE CLIMATE OFFICE. **Climate of Phoenix summary**. Arizona, sem data. Disponível em: <<https://azclimate.asu.edu/climate/climate-of-phoenix-summary/>>. Acesso em: 10 Agosto 2016.

ASTM INTERNATIONAL. **C127 – 15**: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2015.

ASTM INTERNATIONAL. **C131/C131M – 14**: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2014.

ASTM INTERNATIONAL. **D3203/D3203M – 11**: Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2011.

ASTM INTERNATIONAL. **D5084 – 16a**: Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2016.

ASTM INTERNATIONAL. **D6390 – 11**: Standard Test Method for Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2011.

ASTM INTERNATIONAL. **D6931 – 12**: Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2012.

ASTM INTERNATIONAL. **D7063/D7063M – 11**: Standard Test Method for Effective Porosity and Effective Air Voids of Compacted Bituminous Paving Mixture Samples. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2011.

ASTM INTERNATIONAL. **D7064/D7064M – 08** (Reapproved 2013): Standard Practice for Open-Graded Friction Course (OGFC) Mix Design. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2013.

ASTM INTERNATIONAL. **D7175 – 15**: Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2015.

ASTM INTERNATIONAL. **D7369 – 11**: Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2011.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros**. 3ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.

BORLINI, Monica Castoldi. **Incorporação de cinza de bagaço de cana de açúcar em massa cerâmica argilosa**. 2006. 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

CCR VIA OESTE. **Contato CCR - Protocolo Nº2304639** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida de <monica.picirillo@grupoccr.com.br> em abr. 2016.

CHEN, J., SUN, Y., LIAO, M., HUANG, C., TSOU, K. Evaluation of Permeable Friction Course Mixes with Various Binders and Additives. **J. Mater. Civ. Eng.**, v. 25, n. 5, p. 573-579, 2013.

COACALLA, T. Z. **Estimativa de propriedades hidráulicas de solos a partir do ensaio de ascensão capilar**. 2012. 166 f. Dissertação de Mestrado (Geotecnia), Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2012.

COLERI, E.; KAYHANIAN, M.; HARVEY, J.; YANG, K.; BOONE, J. Clogging evaluation of open graded friction course pavements tested under rainfall and heavy vehicle simulators. **Journal of Environmental Management**, v. 129, p. 164-172, 2013.

COOLEY, Jr. L. A.; MALLICK, R. B.; MOGAWER, W. S.; PARTL, M.; POULIKAKOS, L.; HICKS, G. **Construction and Maintenance practices for permeable friction courses - NCHRP Report 640**. Transportation Research Board, Washington, D.C., 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB (Brasil). **Histórico da safra de cana-de-açúcar 2005/06 A 2015/16**. Brasília/DF, 2015.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA (Brasil). **Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão externa de bagaço de cana-de-açúcar**. Brasília/DF, 2010

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES – CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2015: Relatório gerencial** – Brasília: CNT: SENAT, 2015.

CORDEIRO, G. C., FILHO, R. D. T., FAIRBAIRN, E. M. R. Caracterização de Cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, v. 32, p. 82-86, 2009.

DAS, P.K.; BALIEU, R.; KRINGOS, N.; BIRGISSON, B. On the oxidative ageing mechanism and its effect on asphalt mixtures morphology. **Materials and Structures**, v. 48, p. 3113–3127, 2015.

DEHGHAN, Z.; MODARRES, A. Evaluating the fatigue properties of hot mix asphalt reinforced by recycled PET fibers using 4-point bending test. **Construction and Building Materials**, v. 139, pp. 384–393, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER (Brasil) **ES-383/99**. Desgaste por abrasão de mistura betuminosas com asfalto polímero - Cantabro. Rio de Janeiro, 1999. 2 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER (Brasil) **ES-386/99**. Pavimentação Pré-misturado a quente com asfalto polímero camada porosa de atrito. Rio de Janeiro, 1999. 15 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER (Brasil) **ME-084/95**. Agregados miúdo – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995. 3 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (Brasil) **ME-135/2010**. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (Brasil) **ME-136/2010**. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010. 6 p.

DEPARTAMENTO DE POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL – DPRF (Brasil). **Balanco de atividades 2014**, Brasília: DPRF – BRASIL, 2015.

DUMKE, Marilan. **Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha**. 2005. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2005.

EDWARDS, J. B. Motorway speeds in wet weather: the comparative influence of porous and conventional asphalt surfacings. **Journal of Transport Geography**, v. 10, p. 303-311, 2002.

ELVIK, R. E GREIBE, P. Road safety effects of porous asphalt: a systematic review of evaluation studies. **Accident Analysis and Prevention**, v. 37: p. 515–522, 2005.

FERREIRA, W. L. G. **Análise do fluxo d'água em revestimentos asfálticos com diferentes permeabilidades**. 2015. 131 f. Dissertação de mestrado (Transportes), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

FRIGIO, F., PASQUINI, E., FERROTTI, G. e CANESTRARI, F. Improved durability of recycled porous asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 48: p. 755-763, 2013.

GUIMARÃES, J.L.; FROLLINI, E.; DA SILVA, E.; WYPYCHC, F.; SATYANARAYANA, K.G. Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 30, p. 407–415, 2009.

HAGOS, Eyassu Tesfamariam. **The Effect of Aging on Binder Properties of Porous Asphalt Concrete**. 2008. 342 f. Dissertation (Master of Science in Road and Transportation Engineering). Technische Universiteit Delft. Delft, 2008

HAMZAH, M. O., HASAN, M. R. M., van de VEN, M. Permeability loss in porous asphalt due to binder creep. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 10–15, 2012.

HASSAN, H. F., AL-JABRI K. S. Effect of organic fibers on open-graded friction course mixture properties. **The International Journal of Pavement Engineering**, v. 6, n. 1, p. 67–75, 2005.

HASSAN, H. F., AL-ORAIMI, S., TAHA, R. Evaluation of Open-Graded Friction Course Mixtures Containing Cellulose Fibers and Styrene Butadiene Rubber Polymer. **J. Mater. Civ. Eng.**, v. 17, n.4, p. 416-422, 2005.

HERNANDEZ-SAENZ, M. A.; CARO, S.; ARÁMBULA-MERCADO, E.; MARTIN, A. E. Mix design, performance and maintenance of Permeable Friction Courses (PFC) in the United States: State of the Art. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 358-367, 2016.

HOMEM, T. **Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímero e adição de fibras**. 2002, 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, 2002.

HOSSAIN, M. K.; KARIM, M. R.; CHOWDHURY, M. R.; IMAM, M. A., HOSUR, M., JEELANI, S.; FARAG, R. Comparative mechanical and thermal study of chemically treated and untreated single sugarcane fiber bundle. **Industrial Crops and Products**, v. 58, p. 78–90, 2014.

INDOT, Indiana Department of Transportation. **Draindown characteristics in uncompacted asphalt mixtures - AASHTO T 305**. Indiana, sem data. Disponível em: <http://www.in.gov/indot/div/mt/aashto/testmethods/aashto_t305.pdf>. Acesso em: 05 Junho 2016.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA (Brasil). **Acidentes em rodovias custam R\$ 40 bilhões por ano**. Brasília, 2015. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=26292&catid=1&Itemid=7>. Acesso em: 08 Outubro 2016.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Gráfico de Precipitação Anual - 2014: Estação A612 - Vitória ES**. Brasília-DF, 2016.

INSTITUTE FOR TRAFFIC ACCIDENT RESEARCH AND DATA ANALYSIS, ITARDA (Japão). **Information no.25**. Tóquio, 2000.

JAHROMI, S. G.; KHODAI, A. Carbon fiber reinforced asphalt concrete. **The Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 33, n. 2B, p. 355-364, 2008.

JEONG, K.; HWANG, S.; LEE, S.; KIM, K. W. Investigation of Rutting Potential of Open Graded Friction Course (OGFC) Mixes Using Asphalt Pavement Analyzer. **Journal of Civil Engineering**, v. 15, n.7, p. 1259-1262, 2011.

JRS. **Services Road Construction – VIATOP**. Disponível em: <http://www.jrs.eu/jrs_en/fiber-solutions/bu-strassenbau/services/>. Acesso em: 24 Maio 2016.

JUNIOR, V. R. A., MIRANDA, J. R. **Combustão do bagaço de cana-de-açúcar, autossuficiência energética e carbono neutro**. Ribeirão Preto, SP: 7º Workshop Agroenergia, 2013.

KANITPONG, K.; BENSON, C. H.; BAHIA, H. U. Hydraulic Conductivity (Permeability) of Laboratory-Compacted Asphalt Mixtures. **Transportation Research Record**, v. 1767, p. 25-32, 2001.

KAYHANIAN, M.; ANDERSON, D.; HARVEY, J.; JONES, D.; MUHUNTHAN, B. Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. **Journal of Environmental Management**, v. 95: p.114-123, 2012.

LEAL, Cláudio. **Aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar em misturas asfálticas**. 2013. 219 f. Tese de doutorado (Engenharia Civil). Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil, 2013.

LIU, Q., CAO, D. Research on material composition and performance of porous asphalt pavement. **Journal of Material in Civil Engineering**, v. 21, n.4, p. 135-140, 2009.

LYONS, K. R.; PUTMAN, B. J. Laboratory evaluation of stabilizing methods for porous asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 772-780, 2013.

MADRID - ESPANHA, M. D. F. Artículo 40.65. **Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas**. Madrid: s.n., 2011.

MAHREZ, A.; KARIM, M.; KATMAN, H. Fatigue and deformation properties of glass reinforced bituminous mixtures. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v. 6, p. 997-1007, 2005.

MALLICK, R. B.; KANDHAL P.S.; COOLEY, Jr. L. A.; WATSON, D. E. **Design, construction, and performance of new generation open-graded friction courses**. NCAT Report No. 2000-01, 2000.

MARQUES, G. L. O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; Efeito da compactação por impacto e giratória**. 2004. 461 f. Tese de doutorado (Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

MO, L. **Damage development in the adhesive zone and mortar of porous asphalt concrete**. 2009. 246f. Ph.D Thesis. Delft University of Technology - Netherlands, 2009.

MO, L.; HUURMAN, M.; WOLDEKIDAN, M.F.; WU, S. P.; MOLENNAR, A. A. A. Investigation into material optimization and development for improved ravelling resistant porous asphalt concrete. **Materials and Design**, v. 31, p. 3194–3206, 2010.

MO, L.; HUURMAN, M.; WU, S.; MOLENNAR, A. A. A. Mortar fatigue model for meso-mechanistic mixture design of ravelling resistant porous asphalt concrete. **Materials and Structures**, v. 47, p. 947–961, 2014.

MOMM, L. e DUMKE, M. **Estudo do concreto asfáltico drenante modificado por copolímeros SBS, polímeros e asfalto-borracha**. Florianópolis, SC: 8º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2004.

MOTTA, L. A. C.; AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **Caracterização de fibras curtas empregadas na construção civil**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo, SP, Brasil, 2007.

MOUILLET, V.; FARCAS, F.; CHAILLEUX, E.; SAUGER, L. Evolution of bituminous mix behaviour submitted to UV rays in laboratory compared to field exposure. **Materials and Structures** v. 47, p. 1287–1299, 2014.

NICHOLLS, J. C. Review of UK porous asphalt trials - TRL Rep. 264. **Transport Research Laboratory**, London, 1997.

OLIVEIRA, Carlos. **Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante**. 2003. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasil. Brasília, 2003

PARTL, M., PASQUINI, E., CANESTRARI, F.; VIRGILI, A. Analysis of water and thermal sensitivity of open graded asphalt rubber mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 283-291, 2010.

PINHEIRO, J. H. M. **Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (processos úmidos e secos)**. 2004. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, 2004.

PORTO, H. G. **Pavimentos Drenantes**. 1ª ed. São Paulo: D&Z Computação Gráfica e Editora, 1999.

POULIKAKOS, L., PARTL, M. Evaluation of moisture susceptibility of porous asphalt concrete using water submersion fatigue tests. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 3475–3484, 2009.

PUNITH, V. S. e VEERARAGAVAN, A. Characterization of OGFC Mixtures Containing Reclaimed Polyethylene Fibers. **J. Mater. Civ. Eng.**, v. 23, n. 3, p. 335-341, 2011.

PUTMAN, B. J.; LYONS, K. R. Laboratory Evaluation of Long-Term Draindown of Porous Asphalt Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n.10, p. 04015009, 2015.

SHADMAN, M.; ZIARI, H. Laboratory evaluation of fatigue life characteristics of polymer modified porous asphalt: A dissipated energy approach. **Construction and Building Materials**, v. 138, p. 434-440, 2017.

SHIRINI, B.; IMANINASAB, R. Performance evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 165–171, 2016.

TRANSIT NEW ZEALAND (Nova Zelândia). **Specification for open graded porous asphalt**. 2007. 10 p.

TRIGOS, D. F., CARO, S. **A visual research in permeable friction course mixture (PFC)**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=_GXm6VIRRG4>. Acesso em: 19 Abril 2016.

TUCHUMANTEL JÚNIOR, Osvaldo. **O uso de fibras de celulose em pavimentação**. Disponível em: <<http://www.sinicesp.org.br/materias/2013/bt03a.htm>>. Acesso em: 09 Abril 2016.

USICITY. **Camada porosa de atrito, trecho: Rodoanel - Osasco**. Disponível em: <<http://www.usicity.empresacity.com.br/tracosoespeciais/cbuq-drenante-%28cpa%29>>. Acesso em: 03 Maio 16

VASCONCELOS, K. L. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pela metodologia marshall e superpave com diferentes granulometrias**. 2004. 149 f. Dissertação de mestrado, programa de mestrado em engenharia de transportes, Fortaleza, CE, Brasil, 2004.

WATTS, G. R., CHANDLER-WILDE, S. N. & MORGAN, P. A. The combined effects of porous asphalt surfacing. **Applied Acoustics**, v. 58, p. 351-377, 1998.

WU, S.; LIU, G.; MO, L.; CHEN, Z.; YE, Q. Effect of fiber types on relevant properties of porous asphalt. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 16, p. 791-795, 2006.

WURST, J. E., PUTMAN, B. J. Laboratory Evaluation of Warm-Mix Open Graded Friction Course Mixtures. **J. Mater. Civ. Eng.**, v. 25, n. 3, p. 403-410, 2013.

XU, B., CHEN, J., ZHOU, C., WANG, W. Study on Marshall Design parameters of porous asphalt mixture using limestone as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 846-854, 2016.

YOO, P. J.; KIM, T. W. Strengthening of hot-mix asphalt mixtures reinforced by polypropylene-impregnated multifilament glass fibres and scraps. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 415–420, 2015.