



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
ÁREA GEOTÉCNICA

Laiana Ferreira da Costa

ANÁLISE DO USO DAS FIBRAS DO PSEUDOCAULE DA BANANEIRA
EM MISTURAS ASFÁLTICAS SMA

Campina Grande – PB

2017

LAIANA FERREIRA DA COSTA

**ANÁLISE DO USO DAS FIBRAS DO PSEUDOCAULE DA BANANEIRA
EM MISTURAS ASFÁLTICAS SMA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre (Msc) em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotécnica

Orientador: Prof. Dsc. Adriano Elísio, de Figueiredo Lopes Lucena

Orientadora: Prof. Dsc Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena

Campina Grande – PB

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C837a Costa, Laiana Ferreira da.
Análise do uso das fibras do pseudocaule da bananeira em misturas asfálticas SMA / Laiana Ferreira da Costa. – Campina Grande, 2017.
161 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2017.

"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena, Prof.^a Dr.^a Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena".

Referências.

1. SMA. 2. Fibras de Bananeira. 3. Escorrimento. 4. Propriedades Mecânicas. I. Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. II. Lucena, Lêda Christiane de Figueiredo Lopes. III. Título.

CDU 625.85(043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor (a): Laiana Ferreira da Costa

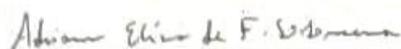
Título: **ANÁLISE DO USO DAS FIBRAS DO PSEUDOCAULE DA BANANEIRA EM MISTURAS ASFÁLTICAS SMA.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração – Geotécnica

Dissertação Defendida e Aprovada em: 25/ 04/ 2017

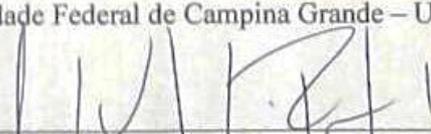
Pela Banca Examinadora:



Orientador: Prof. Dsc. Adriano Elísio, de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



Orientadora: Profª. Dsc. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG


Avaliador Interno: Prof. Dsc. John Kennedy Guedes Rodrigues
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG


Avaliadora Externa: Profª. PhD Kamila Lima Vasconcelos
Universidade de São Paulo – USP

DEDICATÓRIA

À DEUS, que até aqui me guiou.

À razão do meu viver: meus pais, Ronaldo e Lourdes, e meus irmãos, Luana e Raniel, pelo amor gratuito, verdadeiro, insubstituível e eterno.

AGRADECIMENTOS

Ao DEUS de amor, pela dádiva da vida, pelas oportunidades que me confia e por ser minha luz e minha direção diante das incertezas, minha força diante das adversidades, minha esperança diante das aflições e minha alegria diante das vitórias. A Ele toda a honra e toda a glória.

Aos meus pais, Ronaldo e Lourdes, por todo o esforço em prol dos meus estudos e pelo apoio, amor, cuidado, confiança e incentivo em cada etapa da minha vida;

Aos meus irmãos, Raniel e Luana, pela união, carinho e companheirismo de sempre;

A todos os meus familiares e amigos, por toda a energia positiva e estímulo emanados.

A todas as Irmãs do Carmelo Sagrado Coração de Jesus e Madre Teresa, em especial à Irmã Regina Lúcia, por terem me fortalecido por meio de suas orações.

Aos meus orientadores, professor Adriano e professora Lêda, pela paciência, pelo incentivo, por serem sempre tão disponíveis, por todo o auxílio intelectual e pessoal e por todos os conhecimentos compartilhados, meu muito obrigada!

Ao amigo Daniel, pela grandiosa ajuda nos ensaios laboratoriais, por ter sido sempre tão altruísta e amigo e por todo o encorajamento. Sou muito grata!

Aos meus amigos de mestrado, Thays, Nataliene, Mauro, Paulo, Pablllo, Raquel, Thiago e Cristiane por todos os momentos vividos nessa jornada, pelo companheirismo, pelos conhecimentos partilhados, e por vocês serem as pessoas que vocês são, pois, o jeito individual de cada um me proporcionou um grande crescimento profissional e humano. Jamais os esquecerei.

Ao meu eterno orientando, Maurício, e meus eternos “PIVICs”, Lucas e Ablenya. Vocês foram fundamentais para a realização dessa pesquisa. Muito obrigada por cada corpo de prova moldado, por cada momento de descontração, pela dedicação e prontidão que vocês sempre tiveram durante toda a pesquisa. Que Deus os recompense!

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG, Jadilson e Ildinho por toda a ajuda e amizade durante a minha estadia no LEP.

A UFCG, prezada instituição que me promoveu a formação de Engenheira Civil e de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental;

Ao CNPq, pela bolsa de estudo concedida;

E, finalmente, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para conclusão deste trabalho. Muito obrigada!

“Mas aqueles que esperam no Senhor renovam as suas forças. Voam alto como águias; correm e não ficam exaustos, andam e não se cansam. “

(Isaías 40:31)

RESUMO

A *Stone Matrix Asphalt* (SMA) é uma mistura asfáltica que otimiza o contato grão a grão devido a sua alta porcentagem de agregado graúdo, elevando a resistência ao cisalhamento do revestimento e conseqüentemente o desempenho estrutural deste. Fibras sintéticas e ligantes asfálticos modificados por polímero são, geralmente, utilizados para evitar o escorrimento devido ao alto teor de ligante empregado nesse tipo de mistura. O agronegócio da banana, de grande importância para a economia brasileira e nordestina, é um dos grandes geradores de rejeitos pós-colheita, destacando-se o pseudocaule da planta de onde pode ser extraída fibras consideradas de boa qualidade para a aplicação nos mais diversos fins. A presente pesquisa tem por objetivo analisar a viabilidade da incorporação da fibra do pseudocaule da bananeira do tipo Pacovan (variedade mais produzida no país, principalmente no Nordeste) em misturas asfálticas do tipo SMA e avaliar a influência do comprimento dessas fibras no desempenho da mistura. Para isso foram realizados testes de escorrimento tanto para identificar o teor ideal de fibra de bananeira para a diminuição do escorrimento do ligante quanto para avaliar a influência do comprimento da fibra nesse parâmetro. Posteriormente, com o uso do teor ótimo da fibra obtido, foram realizados ensaios para determinar as propriedades mecânicas da mistura (estabilidade Marshall, Lottman modificado, resistência a tração, cântabro, módulo de resiliência, fadiga à tensão controlada, módulo dinâmico e *flow number*) variando o comprimento desta. Em geral, os resultados indicaram que a fibra do pseudocaule da bananeira do tipo Pacovan pode ser uma alternativa viável para SMA, tanto pela capacidade de controle do escorrimento quanto pelas melhorias proporcionadas nas propriedades mecânicas da mistura, sendo o comprimento de 20mm aquele que propiciou melhor desempenho da SMA em todos os aspectos supracitados.

Palavras chave: SMA, fibras de bananeira, escorrimento, propriedades mecânicas

ABSTRACT

Stone Matrix Asphalt (SMA) is an asphalt mixture that optimizes stone-to-stone contact due to its large coarse aggregate fraction, increasing the shear strength of the pavement surface layer and consequently its structural performance. Synthetic fibers and polymer modified asphalt binders are generally used to prevent draindown due to high contents of binder employed in this type of mixture. The agribusiness of banana, which has a great importance in the Brazilian and Northeastern economies, is one of the major generators of post-harvest rejects, highlighting the false stem of the plant from which can be extracted fibers considered of good quality for application in diverse purposes. The aim of the present research was to analyze the feasibility of incorporating Pacovan banana false stem fiber (cultivar most produced in the country, mainly in the Northeast region) in SMA mixtures and evaluate the influence of these fibers length on the performance of the mixture. For this purpose, draindown tests were performed to identify the ideal banana fiber content in order to decrease binder draindown and evaluate the influence of fiber length on this parameter. Afterwards, tests were performed to determine the mechanical properties of the binder (stability Marshall, modified Lottman, tensile strength, Cantabro, resilience modulus, controlled stress fatigue, dynamic modulus and flow number) using the optimal fiber content obtained and varying the length of the fiber. In general, the results indicated that the fiber from the false stem of Pacovan banana plant may be a viable alternative for SMA, both for the stabilizing capacity of draindown and for improvements in the mechanical properties of the mixture. The length of 20mm provided the best performance of SMA

Key words: SMA, banana fibers, draindown, mechanical properties

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplos de curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas a quente	30
Figura 2: Diferença entre o esqueleto de agregados de uma mistura asfáltica SMA e de uma mistura asfáltica contínua convencional.....	34
Figura 3: Resultado do ensaio de fadiga para as misturas asfálticas SMA sem fibra, com poliéster e com fibras naturais	52
Figura 4: Maiores produtores de banana no mundo	55
Figura 5: Unidades federativas com as maiores produções de bananas – Quantidade em % ..	56
Figura 6: Produção de bananas em todas as regiões brasileiras – Quantidade em (t)	56
Figura 7: Produção de bananas em todos os estados nordestinos – Quantidade em (%)	57
Figura 8: Partes da bananeira.....	58
Figura 9: Localização de cada tipo de fibra na bainha foliar.....	59
Figura 10: Máquina desfibradora	61
Figura 11: Curvas TGA da fibra da bananeira roxa	64
Figura 12: Curvas DTA da fibra da bananeira roxa	64
Figura 13: DRX da fibra da bananeira roxa	64
Figura 14: Fluxograma do programa experimental da pesquisa.....	66
Figura 15: Fibras de bananeira	67
Figura 16: Agregados graúdos: (a) Brita 19mm; (b) Brita 9,5mm	67
Figura 17: Pó de pedra.....	68
Figura 18: Cal hidratada	68
Figura 19: CAP 50/70.....	69
Figura 20: Propriedade privada de onde foram obtidas as bananeiras para a pesquisa.....	69
Figura 21: Corte do pseudocaule	70
Figura 22: Bainhas foliares.....	70
Figura 23: Processo de extração e corte das fibras de bananeira.....	71
Figura 24: Esquema do ensaio de EDX.....	72
Figura 25: Equipamento EDX 720 da Shimadzu	73
Figura 26: Incidência de um feixe de raios X sobre um cristal.	74
Figura 27: Equipamento EDX 720 da Shimadzu	74
Figura 28: Esquema de um equipamento para análises termogravimétricas.....	75
Figura 29: Esquema de um equipamento para análises térmica diferencial (DTA).....	75

Figura 30: Distribuição granulométrica dos agregados graúdos e miúdo	76
Figura 31: Medição das dimensões de uma partícula de agregado graúdo	79
Figura 32: Partículas fraturadas da brita 19mm.....	80
Figura 33: Etapa da avaliação visual	81
Figura 34: Ensaio de Equivalente de Areia	81
Figura 35: Ensaio de Angularidade do agregado miúdo	82
Figura 36: Viscosidade x Temperatura.....	85
Figura 37: Curva de Fuller – Composição granulométrica superior	87
Figura 38: Curva de Fuller – Composição granulométrica intermediária.....	87
Figura 39: Curva Fuller – Composição granulométrica inferior	87
Figura 40: Representação esquemática dos grupos de corpos de prova das três composições granulométricas	88
Figura 41: Representação esquemática dos grupos de corpos de prova da composição granulométrica inferior, variando o teor de ligante.	89
Figura 42: V _v x Teor de ligante.....	90
Figura 43: V _v x VAM	90
Figura 44: Sequência do Rice teste	92
Figura 45: Representação esquemática dos parâmetros volumétricos VCA _{MIX} e VCA _{DRC} de controle do SMA	93
Figura 46: Adição da fibra por via seca.....	94
Figura 47: Procedimentos da etapa de mistura das SMAs avaliadas	94
Figura 48: Homogeneização manual deficiente	95
Figura 49: Corpos de prova da SMA (altura e diâmetro).....	95
Figura 50: Procedimentos usados na confecção das SMAs avaliadas.....	96
Figura 51: Procedimentos do ensaio de escoamento	99
Figura 52: Ensaio de estabilidade Marshall.....	100
Figura 53: Procedimentos do ensaio de Lottman modificado	101
Figura 54: Esquema do ensaio de compressão diametral	102
Figura 55: Ensaio de resistência à tração.....	103
Figura 56: Aspecto dos corpos de prova ante e depois do ensaio	104
Figura 57: Ensaio de módulo de resiliência.....	105
Figura 58: Deslocamentos resilientes instantâneo.....	105

Figura 59: Representação esquemática do comportamento da tensão e da deformação no ensaio de fadiga à tensão controlada	106
Figura 60: Ensaio de fadiga	108
Figura 61: Exemplificação do cálculo do Módulo dinâmico	109
Figura 62: Realização do ensaio de módulo dinâmico	110
Figura 63: Regiões durante o ensaio uniaxial de carga repetida e obtenção do FN	111
Figura 64: Difratoograma da fibra de bananeira	114
Figura 65: Termograma da fibra de bananeira	115
Figura 66: Escorrimento da mistura SMA sem aditivo estabilizador.....	118
Figura 67: Decréscimo do escorrimento com o aumento do teor de fibra de bananeira (20mm) na mistura SMA.....	119
Figura 68: Escorrimento X Teor de fibra de bananeira (20mm)	120
Figura 69: Escorrimento X Comprimento de fibra de bananeira (0,3%)	121
Figura 70: Estabilidade Marshall x Comprimento da fibra (0,3%)	122
Figura 71: RRT X Comprimento da fibra (0,3%)	124
Figura 72: RT X Comprimento da fibra (0,3%)	125
Figura 73: Cântabro X Comprimento da fibra (0,3%).....	126
Figura 74: MR instantâneo (5°C) X Comprimento da fibra (0,3%).....	127
Figura 75: MR instantâneo (25°C) X Comprimento da fibra (0,3%).....	127
Figura 76: MR instantâneo (45°C) X Comprimento da fibra (0,3%).....	127
Figura 77: Vida de Fadiga x Diferença de Tensões.....	131
Figura 78: Vida de Fadiga x Deformação específica resiliente.....	132
Figura 79: Curva mestra da SMA sem fibra.....	134
Figura 80: Curva mestra da SMA com fibra de 5mm	135
Figura 81: Curva mestra da SMA com fibra de 10mm	135
Figura 82: Curva mestra da SMA com fibra de 15mm	136
Figura 83: Curva mestra da SMA com fibra de 20mm	136
Figura 84: Curvas mestras de todas as SMAs avaliadas	137
Figura 85: Módulo dinâmico das SMAs (4°C).....	137
Figura 86: Módulo dinâmico das SMAs (21°C).....	138
Figura 87: Módulo dinâmico das SMAs (37°C).....	138
Figura 88: Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (T=4°C)	139
Figura 89: Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (T=21°C)	139

Figura 90: Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (T=37°C)	139
Figura 91: Resultado do ensaio de Flow number	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Faixas granulométricas para a SMA pela especificação alemã.....	37
Tabela 2: Requisitos para a SMA pela especificação alemã	37
Tabela 3: Faixas granulométricas da mistura SMA segundo AASHTO MP 8-02/01.....	38
Tabela 4: Características e propriedades da mistura SMA segundo AASHTO MP 8-02/01 ...	39
Tabela 5: Faixas granulométricas da mistura SMA segundo a ET-DE-P00/031	40
Tabela 6: Requisitos de qualidade para os agregados graúdos das misturas asfálticas SMA ..	41
Tabela 7: Requisitos de qualidade para os agregados miúdos das misturas asfálticas SMA ...	41
Tabela 8: Recomendações finlandesas para adição de fibras em misturas asfálticas.....	45
Tabela 9: Resultados do ensaio de escorrimento para SMA com fibra de coco	47
Tabela 10: Propriedades mecânicas da mistura asfáltica SMA com fibra de coco	48
Tabela 11: Resultados do ensaio de escorrimento para misturas asfálticas SMA com bagaço de cana de açúcar.....	49
Tabela 12: Propriedades mecânicas da mistura asfáltica SMA com bagaço de cana de açúcar	49
Tabela 13: Resultados do ensaio de escorrimento para misturas asfálticas SMA com fibra sintética e com fibra de juta.....	50
Tabela 14: Propriedades mecânicas da mistura asfáltica SMA com fibra sintética e com fibra de juta	50
Tabela 15: Resultados do ensaio de escorrimento para misturas asfálticas SMA com poliéster e fibra de sisal, coco e celulose.....	51
Tabela 16: Propriedades mecânicas das misturas asfálticas SMA sem fibra, com poliéster e com fibras naturais.....	52
Tabela 17: Resultados do ensaio de escorrimento para misturas asfálticas SMA com fibra de coco, sisal e bananeira	53
Tabela 18: Propriedades mecânicas das misturas asfálticas SMA com fibra de coco, sisal e bananeira.....	53
Tabela 19: Resultado do ensaio de estabilidade Marshall (kN) das misturas asfálticas SMA com fibra de bananeira, variando o teor de ligante.....	54
Tabela 20: Propriedades da fibra de bananeira.....	62
Tabela 21: Massa específica real e aparente e absorção dos agregados graúdos e miúdo	77
Tabela 22: Resultado do ensaio de abrasão Los Angeles	78

Tabela 23:Resultado do ensaio de partículas planas e alongadas.....	79
Tabela 24: Resultado do ensaio da determinação das porcentagens de partículas fraturadas ..	80
Tabela 25: Resultado do ensaio de equivalente de areia	82
Tabela 26: Resultado do ensaio de angularidade do agregado miúdo.....	83
Tabela 27: Resumo da caracterização do ligante.....	85
Tabela 28: Faixa 19mm da AASHTO MP 8-02/01	86
Tabela 29: Parâmetros da mistura SMA com 6,2% de CAP	90
Tabela 30: Traço da mistura de projeto	90
Tabela 31: Nível de tensão referente a cada temperatura	109
Tabela 32: Composição química da fibra de bananeira.....	112
Tabela 33: Índice de cristalinidade da fibra de bananeira	114
Tabela 34: Índice de cristalinidade de outras fibras naturais.....	115
Tabela 35: Temperatura de início de degradação de algumas fibras lignocelulósicas, obtidas em TG.....	116
Tabela 36: Valores de escoamento para a SMA sem aditivo estabilizador.....	118
Tabela 37: Valores de escoamento para a SMA com a adição da fibra de bananeira (20mm), variando o seu teor.....	119
Tabela 38: Valores de escoamento para a SMA com a adição da fibra de bananeira, variando o seu comprimento	121
Tabela 39: Resumo das características das curvas de vida de fadiga das misturas SMA avaliadas	133
Tabela 40: Valores mínimos de Flow number para diferentes níveis de tráfego	141

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Vantagens e desvantagens relatadas dos tipos comuns de fibras	46
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMPT	<i>Asphalt Mixture Performance Test</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Concreto asfáltico
CAP	Cimento asfáltico
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
CE	Ceará
CEPA	Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola
CNT	Confederação Nacional de Transportes
CPA	Camada porosa de atrito
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração de raio X
DTA	Análise térmica diferencial
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EDX	Espectrometria de fluorescência de raios X por Energia Dispersiva
FBRN	Fibra de bananeira roxa <i>in natura</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FN	<i>Flow number</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICTAC	<i>International Confederation of Thermal Analysis and Calorimetry</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCM	Laboratório de Caracterização de Materiais
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
máx.	Máximo
mín.	Mínimo
MR	Módulo de resiliência (MPa)
NAPA	<i>National Asphalt Pavement Association</i>
NBR	Norma brasileira
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>

PB	Paraíba
RLPD	Teste de deformação permanente de carga repetida
RN	Rio Grande do Norte
RRT	Resistência à tração retida
RT	Resistência à tração por compressão diametral
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
RTu	Resistência à tração por compressão diametral após ciclo de condicionamento
SC	Santa Catarina
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SMA	Stone Matrix Asphalt
SUPERPAVE	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
TA	Análise Térmica
TG	Análise termogravimétrica
TRLPD	Teste triaxial de deformação permanente de carga repetida
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UTM	Universal Testing Machines
VAM	Vazios no agregado mineral
Vv	Volume de vazios

LISTA DE SÍMBOLOS

$ E^* $	Módulo Dinâmico
$\Delta\sigma$	Diferença de tensões no centro do corpo de prova (MPa)
$^{\circ}\text{C}$	Grau celsius
$^{\circ}\text{C}/\text{min}$	Grau celsius por minuto
Å	Ångström
cm	Centímetro
cP	Centipoise
D	Diâmetro do corpo de prova
d	Distância interplanar
Dr.	Doutor
e.g.	<i>Exempli gratia</i>
g	Gramma
G_{mb}	Massa específica aparente medida (g/cm^3)
G_{mm}	Densidade máxima medida (g/cm^3)
G_s	Massa específica da fração graúda do agregado seco compactado, kg/dm^3
G_{sb-g}	Massa específica aparente combinada dos agregados graúdos (g/cm^3)
G_w	Massa específica da água ($998\text{kg}/\text{m}^3$)
H	Altura do corpo de prova
Hab	Habitante
Hz	Hertz
K_1, K_2, K_3, K_4	Parâmetros determinados no ensaio de fadiga
Kg	Quilo
Kgf	Quilograma-força
Km	Quilômetro
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
kV	Quilovolt
mA	Miliamper
ml/min	Mililitro por minuto
mm	Milímetro
MPa	Megapascal

M_s	Massa seca do corpo de prova (g)
M_{ss}	Massa do corpo de prova com a superfície seca (g)
M_{sub}	Massa submersa do corpo de prova (g)
M_{sub}	Massa submersa do corpo de prova (g)
N°	Número
$N_{projeto}$	Número de giros de projeto no compactador SUPERPAVE
P_{ag}	Porcentagem de agregados graúdos na mistura total (em peso) (%)
P/A	Proporção pó/asfalto
$P_{mín}$	Carga de contato no ensaio de Módulo Dinâmico
Rh	Ródio
rpm	Rotação por minuto
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
T_a	Temperatura da amostra
T_r	Temperatura de referência
VCA_{DRC}	Vazios da fração graúda do agregado compactado
VCA_{MIX}	Vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada
ΔT	Diferença de temperatura
$\Delta \sigma$	Diferença de tensões
ϵ_i	Deformação resiliente específica
θ	Ângulo de difração
λ	Comprimento de onda dos raios X incidentes
σ_t	Resistência à tração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1.	Objetivos.....	26
1.1.1	Objetivo geral	26
1.1.2	Objetivos específicos	26
1.2.	Organização do trabalho	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.1	Classificação das misturas asfálticas à quente quanto à graduação.....	28
2.2	Stone Matrix Asphalt (SMA)	30
2.2.1	Histórico da SMA	30
2.2.2	Principais características da mistura SMA	33
2.2.3	Especificações para a mistura asfáltica SMA	36
2.3	Principais parâmetros das fibras usadas em materiais compósitos	42
2.4	Utilização de fibras como aditivo estabilizador	43
2.5	Experiências com fibras naturais em misturas asfálticas SMA	46
2.6	A bananeira: concepções econômicas e de cultivo.....	54
2.6.1	A prática da bananicultura	54
2.6.2	Resíduos da bananicultura	57
2.7	A fibra do pseudocaule da bananeira: alternativa para uso em SMA.....	59
2.8	Considerações finais	65
3	MATERIAIS E MÉTODOS	66
3.1	Materiais	67
3.1.1	Fibras de bananeira	67
3.1.2	Agregados graúdos	67
3.1.3	Agregado miúdo	68
3.1.4	Fíler.....	68
3.1.5	Cimento asfáltico de petróleo (CAP).....	68
3.2	Métodos	69
3.2.1	Extração da fibra	69
3.2.2	Caracterização das fibras de bananeira	72
3.2.2.1	Espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX)	72
3.2.2.2	Difração de raio X (DRX).....	73

3.2.2.3	Análise térmica	74
3.2.3	Propriedades física dos agregados	76
3.2.3.1	Distribuição granulométrica dos grãos	76
3.2.3.2	Massa específica e absorção	77
3.2.3.3	Determinação da abrasão “Los Angeles”	77
3.2.3.4	Partículas planas e alongadas.....	78
3.2.3.5	Partículas fraturadas.....	79
3.2.3.6	Adesividade	80
3.2.3.7	Equivalente de areia.....	81
3.2.3.8	Angularidade.....	82
3.2.4	Caracterização do cimento asfáltico de petróleo	83
3.2.4.1	Ensaio de caracterização do cimento asfáltico de petróleo	83
3.2.5	Dosagem SUPERPAVE	86
3.2.5.1	Obtenção dos parâmetros volumétricos das misturas SMAs avaliadas	91
3.2.5.2	Detalhes das etapas de mistura e compactação das SMAs avaliadas	93
3.2.6	Propriedades das misturas asfálticas SMA	97
3.2.7	Sensibilidade ao escorrimento	98
3.2.8	Estabilidade Marshall	100
3.2.9	Dano por umidade induzida – Lottman Modificado.....	100
3.2.10	Resistência à tração por compressão diametral (RT).....	101
3.2.11	Cântabro.....	103
3.2.12	Módulo de resiliência (MR).....	104
3.2.13	Fadiga por compressão diametral à tensão controlada	106
3.2.14	Módulo dinâmico ($ E^* $)	108
3.2.15	Flow number (FN)	110
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	112
4.1	Caracterização da fibra de bananeira.....	112
4.1.1	Espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX)	112
4.1.2	Difração de raio X (DRX).....	113
4.1.3	Análise térmica	115
4.2	Propriedades das misturas asfálticas SMA	117
4.2.1	Sensibilidade ao escorrimento	117
4.2.2	Estabilidade Marshall	121

4.2.3	Dano por umidade induzida – Lottman modificado	123
4.2.4	Resistência à tração por compressão diametral (RT).....	124
4.2.5	Cântabro.....	125
4.2.6	Módulo de resiliência (MR).....	126
4.2.7	Fadiga por compressão diametral à tensão controlada	129
4.2.8	Módulo dinâmico ($ E^* $)	134
4.2.9	Flow number (FN)	140
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	142
5.1	Conclusões.....	142
5.2	Sugestões para pesquisas futuras	144
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de dimensões continentais e por esse motivo necessita de uma ampla rede articulada que ligue os diferentes pontos do território nacional a fim de propiciar o melhor deslocamento de pessoas e mercadorias. Pesquisa realizada pela Confederação Nacional de Transportes (CNT) no ano de 2016 mostrou que a participação do modal rodoviário na matriz brasileira de transportes de carga e passageiros é de 61,1%, sobrepondo-se frente aos modais ferroviário (20,7%), aquaviário (13,6%), dutoviário (4,2%) e aéreo (0,4%). No entanto, mesmo com a significância deste primeiro para o desenvolvimento do país, entre 2015 e 2016 a CNT constatou que apenas 12,3% do total da malha rodoviária brasileira é pavimentada e que 54,6% desta encontra-se em estado de conservação deficiente, ruim ou péssimo.

Segundo Lavasani et al. (2015) o revestimento do pavimento, camada que é responsável pela transferência de cargas de roda para camadas inferiores (base, sub-base e subleito), é uma parte crítica da estrutura das rodovias por receber as solicitações do tráfego e está submetida diretamente aos fatores ambientais. Leal (2013) afirma que o crescimento da quantidade de veículos em circulação nas rodovias associado ao aumento do peso e do número de eixos dos veículos comerciais têm levado à deterioração precoce dos revestimentos asfálticos.

Os defeitos mais comuns encontrados, em decorrência dos fatores mencionados anteriormente, são as trincas por fadiga e as deformações permanentes em trilhas de rodas. Os primeiros são relacionados às cargas repetidas de tráfego e, também, à elasticidade da mistura e os segundos desenvolvem-se gradualmente com o aumento de solicitações de cargas por eixo (ARAO, 2014). Com o objetivo de se obter revestimentos asfálticos mais resistentes e duráveis, países desenvolvidos (Estados Unidos, Alemanha, Holanda, entre outros) estão usando a mistura asfáltica denominada “*Stone Matrix Asphalt*” ou “*Stone Mastic Asphalt*”, também conhecida pela sigla SMA (MOURÃO, 2003).

Segundo Neves Filho (2004) a SMA apresenta granulometria descontínua, composta por uma maior fração (entre 70% e 80%) de agregados graúdos, rico mástique e geralmente consomem de 1% a 1,5% mais ligante asfáltico, quando comparada às misturas convencionais. A SMA é uma mistura flexível, estável, resistente a afundamentos de trilha de roda, que tem no contato grão/grão o responsável por sua resistência e no mástique a durabilidade da mistura (NAPA, 2002).

Em função do alto teor de ligante asfáltico na SMA surgiu a necessidade da utilização de aditivos estabilizantes ou de asfalto modificado por polímeros, para evitar o risco do escorrimento (escoamento do ligante durante as etapas de usinagem e compactação) e de segregação ou exsudação durante as etapas supracitadas. Segundo Leal (2013) os agentes estabilizantes mais utilizados são as fibras, sintéticas ou naturais, que não produzem alteração química no ligante asfáltico, alterando apenas as propriedades físicas.

Nos últimos anos, o conceito de desenvolvimento sustentável tem sido cada vez mais aplicado pelos setores produtivos. A consciência de que o gerenciamento dos resíduos é uma questão estratégica para as empresas tem levado pesquisadores a buscar alternativas para o reaproveitamento destes. A tendência é que este reaproveitamento seja cada vez mais intensificado e incentivado por mecanismos como o da International Organization for Standardization (ISO) em sua norma ABNT NBR ISO 14001: 2015, que tem como escopo fazer com que as empresas implementem, mantenham e melhorem um sistema de gestão ambiental, demonstrando tal conformidade a terceiros. Atualmente, esta norma representa um diferencial competitivo entre as empresas, pois a sociedade civil tem priorizado àquelas preocupadas com a questão ambiental.

Os resíduos vegetais, resultantes de processos agroindustriais vêm indicando uma grande potencialidade para fabricação de compósitos e podem constituir em importante fonte de matéria prima para produção de novos materiais, dependendo das quantidades disponíveis e dispersão geográfica (JOHN, 2000). Atualmente pesquisas (Vale, 2007; Kumar et al., 2011; Bindu, 2012; Dikshith, 2012; Oda et al., 2012; Leal, 2013; Vale et al, 2014) estão sendo desenvolvidas com o intuito de analisar a viabilidade de fibras naturais, obtidas de resíduos agroindustriais, em misturas asfálticas SMA.

O agronegócio da banana tem grande importância econômica para o Brasil, que ocupa a quinta posição dentre os maiores produtores desse fruto no mundo. O Nordeste lidera o cultivo por região e a Paraíba ocupa a quinta posição dentre os estados que mais produzem o fruto, principalmente as cultivares Pacovan e Prata. No entanto, apesar da elevada produção e significância para a economia brasileira, pouco se debate sobre a destinação dos resíduos associados a bananicultura, que segundo Roja et al. (2002) representam 40% da produção do fruto onde, de acordo com Gonçalves Filho (2011), para cada tonelada de bananas colhidas são descartadas 3 toneladas de pseudocaules que possuem grande potencial para a produção de fibras. Portanto este trabalho tem por objetivo avaliar a aplicabilidade da incorporação da fibra do pseudocaulo da bananeira do tipo Pacovan em misturas asfálticas SMA.

1.1.Objetivos

1.1.1 Objetivo geral:

Esta pesquisa tem como objetivo analisar a viabilidade da incorporação da fibra do pseudocaule da bananeira do tipo Pacovan em misturas asfálticas do tipo SMA.

1.1.2 Objetivos específicos:

- verificar a viabilidade técnica do uso da fibra do pseudocaule da bananeira na redução do escorrimento do ligante asfáltico das misturas SMA;
- determinar o teor de fibra de bananeira ideal para a diminuição do escorrimento do ligante;
- avaliar o escorrimento e comportamento mecânico (resistência e deformação) das misturas asfálticas SMA utilizando diferentes comprimentos de fibra de bananeira.

1.2.Organização do trabalho

Esta dissertação encontra-se organizada conforme descrito nos tópicos abaixo:

- Capítulo 1 – composto pela introdução da pesquisa, pela exposição dos objetivos (geral e específicos) que se pretende atingir com o estudo e pelo presente tópico, que tem o intuito de mostrar a organização do trabalho.
- Capítulo 2 – compreende a fundamentação teórica, onde são abordados os assuntos mais relevantes ao desenvolvimento deste trabalho tais como: classificação das misturas asfálticas quanto à graduação, informações relevantes sobre a mistura asfáltica SMA, apresentação das principais fibras (naturais e sintéticas) utilizadas como estabilizador em misturas SMA, experiências com fibras naturais usadas em SMA e informações a respeito da bananeira, da prática da bananicultura, das características das fibras da bananeira e da possibilidade da utilização destas em SMA.
- Capítulo 3 – neste são descritos os materiais utilizados na pesquisa e os procedimentos laboratoriais adotados para o desenvolvimento desta dissertação, bem como apresentados os resultados da caracterização dos materiais e da dosagem SUPERPAVE realizada.

- Capítulo 4 – neste são apresentados os resultados obtidos no programa experimental e a análise deles.
- Capítulo 5 – apresentam-se as conclusões que foram obtidas neste trabalho, além de sugestões para pesquisas futuras.

No final do trabalho estão inseridas as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo reúne informações, coletadas em publicações correntes, a respeito dos assuntos abordado. Neste serão apresentados o modo como as misturas asfálticas são classificadas quanto à graduação, uma abordagem sobre a mistura asfáltica SMA e sobre os principais tipos de fibras (naturais e sintéticas) usadas como aditivo estabilizador nesse tipo de mistura. Será apresentada ainda uma síntese das experiências com algumas fibras naturais em SMA, informações sobre a bananeira e suas fibras, a prática da bananicultura e sobre a possibilidade da utilização da fibra do pseudocaule da bananeira em SMA.

2.1 Classificação das misturas asfálticas à quente quanto à graduação

Segundo Roberts et al. (1996), entre os anos de 1868 e 1873, quando se deu início a utilização do alcatrão como ligante asfáltico, não havia uma compreensão da importância da dosagem de agregados na mistura asfáltica, fazendo com que estas não apresentassem bom desempenho. Somente no início do século passado, a relevância da relação entre o tamanho dos agregados começou a ganhar importância, principalmente as frações menores, com os estudos de Clifford Richardson, que em 1906 publicou um livro trazendo a primeira tentativa de se determinar o teor ótimo de ligante em uma mistura asfáltica.

Subsequentemente, investigações foram realizadas visando encontrar a granulometria que otimizasse as propriedades das misturas em relação à estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, textura, impermeabilidade e trabalhabilidade. Bernucci et al. (2008) citam a segregação dos agregados entre os defeitos causados devido a falhas na definição da faixa granulométrica da mistura. Os autores salientam que devido a distribuição granulométrica dos agregados ser uma das características físicas mais importantes, a subdivisão da graduação em algumas classes auxilia na distinção dos tipos de misturas asfálticas, sendo segundo eles os tipos mais usuais as misturas densas, as misturas abertas e as misturas descontínuas.

As misturas densas possuem curva granulométrica contínua e bem-graduada proporcionando um esqueleto mineral com poucos vazios, visto que os agregados de dimensões menores preenchem os vazios dos maiores, e.g. concreto asfáltico (CA) (BERNUCCI, et. al. 2008). A mistura de graduação densa possui quantidade de material fino suficiente para que o

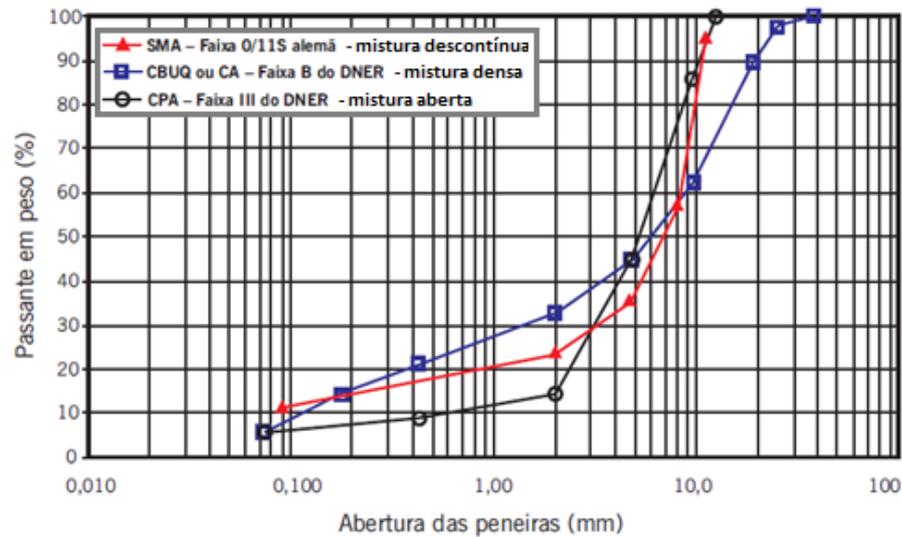
volume de vazios fique normalmente na ordem de 4 a 6% (MAGALHÃES, 2004). Segundo Button et al. (1990) esse tipo de mistura desenvolve resistência a partir do intertravamento dos agregados somado à viscosidade do cimento asfáltico de petróleo que os envolve e é caracterizada por possuir elevada estabilidade. Por outro lado, Dantas Neto et al. (2006) ressaltam que as misturas com graduação densa apresentam problemas relacionados aos baixos valores para atrito entre pneus e a superfície do pavimento, sendo estes relacionados às deficiências de macro-rugosidade destas misturas.

As misturas abertas têm curva granulométrica uniforme com agregados quase exclusivamente de um mesmo tamanho, de forma a proporcionar um esqueleto mineral com muitos vazios interconectados. Estas possuem insuficiência de material fino (menor que 0,075mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores, com o objetivo de tornar a mistura com elevado volume de vazios com ar e, portanto, drenante, possibilitando a percolação de água no interior da mistura asfáltica, e.g. mistura asfáltica drenante, conhecida no Brasil por camada porosa de atrito (CPA) (Bernucci, et al., 2008). Klenzendorf et al. (2011) alertam que um pavimento integralmente poroso pode apresentar problemas relacionados à integridade estrutural, tendo em vista a presença de porosidade ao longo de toda a estrutura.

As misturas descontínuas possuem curva granulométrica com proporcionamento dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos. Desta forma tem-se uma curva descontínua, em certas peneiras, com o objetivo de tornar o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente e com o maior número de contatos entre os agregados graúdos, e.g. matriz pétreas asfáltica (*Stone Matrix Asphalt – SMA*) e mistura sem agregados de certa graduação (*gap-graded*) (BERNUCCI, et al., 2008). Além disso, de acordo com Barreto Junior et al. (2006) nas misturas descontínuas o teor de asfalto tende a ser superior ao das misturas densas (CBUQ) em cerca de 1 a 1,5%, o que pode provocar o escorrimento do ligante asfáltico, fazendo com que alguns países utilizem fibras para evitar esse tipo de problema. As misturas asfálticas descontínuas tendem a ter melhor desempenho em termos de resistência à deformação permanente (devido ao tamanho dos agregados), ao início da fissuração por fadiga e ao desgaste (devido à maior espessura do asfalto), quando comparados com as misturas asfálticas convencionais (NEVES FILHO, 2004).

A Figura 1 apresenta exemplos de curvas granulométricas que ilustram os três tipos de composição do esqueleto mineral.

Figura 1: Exemplos de curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas a quente



Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2008)

2.2 Stone Matrix Asphalt (SMA)

2.2.1 Histórico da SMA

A sigla SMA significa originalmente *Splitt mastix asphalt* conforme designação na Alemanha – local de sua concepção – traduzido em inglês para *Stone Mastic Asphalt*, e posteriormente para *Stone Matrix Asphalt*, sendo esta última terminologia adotada nos Estados Unidos e, atualmente, também no Brasil. Em português SMA pode ser traduzido para matriz pétrea asfáltica, porém a denominação pela sigla original internacionaliza a terminologia e gera menos confusão de conceitos e especificações. (BERNUCCI et al., 2008)

A mistura asfáltica SMA foi concebida na década de 60, tendo como inventor o engenheiro alemão Dr. Zichner, que era gerente do Laboratório Central de Construções Rodoviárias de Strabag Bau AG. Esta teve origem numa tentativa de criar uma mistura asfáltica que resolvesse os problemas no pavimento asfáltico causados pelo uso de pneus com pregos, muito utilizados nos países de clima frio, devido à precipitação de neve. Na época, uma mistura chamada de *Gussasphalt*, concreto asfáltico com baixo teor de agregado graúdo, era usada na Alemanha em camadas de rolamento, porém estas misturas tinham um desgaste muito rápido devido aos pneus com pregos. Desta maneira os principais componentes dessa mistura, mástique e pequena porcentagem de agregados graúdos, não eram suficientemente fortes para prover a vida útil desejada para o revestimento asfáltico. Assim, devido ao elevado custo de

manutenção e restauração das rodovias alemãs na época criou-se forte demanda por uma nova mistura asfáltica, mais forte, que suportaria o tráfego de pneus com pregos (RAMOS, 2012).

De acordo com Blazejowski (2010) Zichner acreditava que o agregado graúdo era resistente à fragmentação dinâmica, o que garantiria uma resistência maior à camada de rolamento. Portanto, ele propôs que os agregados graúdos deveriam ser os principais componentes da mistura, preparada para fornecer à resistência necessária ao desgaste causado pelos pregos dos pneus, enquanto que o alto teor de mástique forneceria uma maior vida útil ao pavimento. Sendo assim, a ideia inicial do SMA consistia em criar um forte esqueleto de agregados graúdos com os espaços entre os grãos preenchidos por um mástique.

A mistura criada por Zichner apresentava uma descontinuidade no tamanho dos agregados, diferente da mistura densa comum à época, caracterizando uma mistura chamada descontínua ou mais comumente conhecida como *gap grading*.

Segundo Silva (2012) o inconveniente era que o alto teor de asfalto na mistura e a temperatura de usinagem (em torno de 180°C) ocasionava o escorrimento do ligante durante o processo de transporte. A forma encontrada para que a mistura apresentasse a consistência necessária durante o trajeto usina/pista, sem perda de material asfáltico, foi a introdução de aditivos estabilizantes, e.g. fibras.

Inicialmente foram utilizadas fibras de asbesto (amianto) para inibir o escoamento do ligante, sendo testadas taxas de 1,0%, depois 0,5-0,7% de fibras de amianto classe 7M. Solucionado o problema do escorrimento com o uso do estabilizador, a mistura pode então ser facilmente transportada, lançada e compactada com os equipamentos tradicionais. (RAMOS, 2012)

De acordo com Fonseca (2011) o primeiro recobrimento de SMA, uma camada de 2 cm de espessura, foi aplicado na rua Freiligrath na cidade de Wilhelmshaven na Alemanha. Ramos (2012) destaca que após a publicação na Alemanha da norma técnica para SMA (ZTV bit-StB 84) a mistura se popularizou e países europeus começaram a testar a mistura SMA.

A proibição do uso dos pregos em pneus na Alemanha, associado ao maior custo comparado às misturas tradicionais, levou ao decréscimo do uso das misturas SMA. Entretanto, a técnica conquistou outros países do continente europeu, onde recebeu as denominações *Stone Mastic Asphalt* e *Stone Matrix Asphalt* (LEAL, 2013).

A partir dos anos 80, conforme afirma Bernucci et al. (2008), a mistura SMA passou a ser utilizada amplamente na Europa, em países como Bélgica, Holanda, Suíça, Suécia, Inglaterra, Espanha, entre outros. Ramos (2012) afirma que o maior crescimento da utilização

do SMA, fora da Europa, se deu por volta dos anos de 1990 quando a mistura se popularizou nos Estados Unidos, com pesquisa e desenvolvimento de normas americanas de SMA (AASHTO MP82 e AASHTO PP41).

NAPA (2002) relata que o primeiro SMA dos EUA foi construído no estado de Wisconsin em 1991, seguido dos estados de Michigan, Geórgia, Missouri durante o mesmo ano. Em 1997, pelo menos 28 estados tinham construído mais de 100 projetos, totalizando mais de 3 milhões de toneladas de SMA.

Segundo Leal (2013) o *National Center for Asphalt Technology* (NCAT), criado por meio do financiamento do *Federal Highway Administration* (FHWA) para avaliar o desempenho dos pavimentos com revestimento em SMA, realizou em 1997 um resumo do desempenho do *Stone Matrix Asphalt* construído nos Estados Unidos. Neste foram avaliados, até 1997, mais de 140 pavimentos construídos com a tecnologia SMA nos seguintes estados: Alaska, Arkansas, Califórnia, Colorado, Geórgia, Illinois, Indiana, Kansas, Maryland, Michigan, Missouri, Nebraska, New Jersey, North Carolina, Ohio, Texas, Virginia, Wisconsin e Wyoming. O estudo concluiu que existiam indicações de um bom desempenho dos pavimentos do tipo SMA, principalmente em áreas de elevado volume de tráfego, apesar dos projetos terem cinco anos ou menos (a maioria dos projetos incluídos na pesquisa foi construída entre 1992 e 1996). A expectativa é que as misturas tenham desempenho semelhante à dos países europeus, onde esse tipo de mistura já é consagrado. NAPA (2002) ainda apresenta que o custo adicional para a construção estava sendo mais do que compensado pelo aumento do desempenho.

Segundo Leal (2013) por volta do ano 2000 o SMA chegou à América do Sul com utilizações na Argentina, Chile e Brasil. O autor salienta que o emprego de misturas asfálticas do tipo SMA é uma prática relativamente nova no Brasil e que a primeira aplicação aconteceu por exigência da Federação Internacional de Automobilismo, no Autódromo José Carlos Pace (Interlagos) em 2000, para melhorar a aderência e reduzir o “spray” nos dias de chuva.

De acordo com Reis et al. (2002) em agosto de 2001 foi construído um trecho experimental de SMA na Via Anchieta (km 044+400 ao km 045+000), com espessura final de 4,0 cm, utilizando a faixa granulométrica alemã 0/11S e asfalto modificado por polímero SBS. Os resultados da aplicação do SMA neste trecho obtiveram grande sucesso e superioridade de comportamento funcional e estrutural em relação a outras soluções asfálticas até então empregadas.

Apesar de pouco utilizada em relação às misturas convencionais, o SMA tem sido empregado em vários trechos de rodovias brasileiras. Na região sudeste, em São Paulo,

destacam-se os trechos na Rodovia Presidente Dutra e no Corredor Tecnológico de Barueri que é sujeito a tráfego severo de caminhões e possui declividade de 10%. Em vias urbanas existem aplicações de SMA na avenida Faria Lima, em São Paulo, e na cidade de São Sebastião, litoral paulista. Na região nordeste destaca-se um trecho experimental construído na avenida General Graça Lessa, no Vale do Ogunjá, em Salvador, Bahia.

Segundo Blazejowski (2010) o SMA mudou pouco desde sua concepção na década de 60 na Alemanha e salienta que esta mistura foi originalmente desenvolvida para utilização como camada superficial de rolamento, porém em alguns países também é usada como camada intermediária ou binder. A SMA atualmente é considerada a mistura ideal para pavimentos asfálticos sujeitos a tráfego pesado que necessite de alta resistência ao dano e longa vida de serviço.

2.2.2 Principais características da mistura SMA

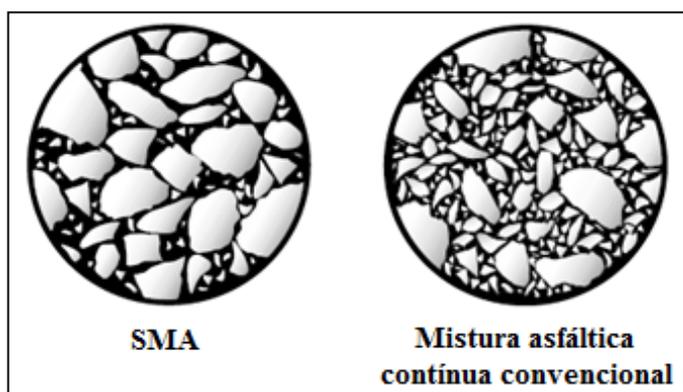
De acordo com a definição encontrada na norma alemã ZTV Asphalt – StB 01, a *Stone Matrix Asphalt* é feita a partir de uma mistura de agregados de graduação descontínua que tem o asfalto como ligante e utiliza aditivo estabilizante.

Assim como o tradicional CBUQ, a SMA é uma mistura asfáltica densa, entretanto sua curva granulométrica apresenta uma descontinuidade pois a proporção dos agregados graúdos é predominante em relação às demais frações. Tal característica é fundamental para o objetivo a que a SMA foi criada: oferecer um esqueleto mineral capaz de maximizar o contato grão/grão na fração graúda, possibilitando um elevado intertravamento à mistura (OLIVEIRA FILHO, 2007).

O esqueleto de agregados graúdos da SMA proporciona elevada resistência às deformações plásticas em relação às misturas asfálticas contínuas, que são concebidas para apresentar resistência ao cisalhamento baseada no conceito de enchimento de vazios por meio da interação entre grãos de diâmetros variados (BALBO, 2007). A Figura 2 apresenta a diferença entre os esqueletos de agregados das duas misturas mencionadas anteriormente.

Conforme afirma Reis et al. (2002) esta mistura se caracteriza por conter entre 70 a 80% de agregados graúdos (retido na peneira nº 04) e ser rica em ligante asfáltico devido sua constituição granulométrica particular, com um consumo de ligante em geral entre 6% e 7%, sendo, portanto impermeável, com cerca de 4% a 6 % de volume de vazios com ar.

Figura 2: Diferença entre o esqueleto de agregados de uma mistura asfáltica SMA e de uma mistura asfáltica contínua convencional



Fonte: Adaptado de NAPA (2002)

Um problema potencial associado à SMA é o escorrimento e a exsudação. A exsudação é causada devido à dificuldade em obter a compactação necessária. O teor elevado de ligante causa o escorrimento, e como as temperaturas de usinagem e compactação não podem ser diminuídas, isso continua a ser um dos principais inconvenientes relacionados ao uso da SMA (SOREN, 2012).

De acordo com Martinho et al. (2013) o problema de escorrimento do ligante nas misturas asfálticas descontínuas (e com conteúdo de ligante relativamente elevado), enquanto são transportadas e compactadas, conduz a heterogeneidades nas características da camada espalhada, tais como porosidades muito diferentes e as consequentes degradações precoces.

Com o intuito de inibir o escorrimento nas misturas asfálticas SMA e evitar assim problemas na execução e/ou na vida útil do pavimento, torna-se necessário a utilização de um inibidor de escorrimento. Em geral são utilizadas fibras, tais como celulose, lã de rocha e materiais orgânicos específicos. A maioria dos inibidores de drenagem são ativos durante o armazenamento, transporte e espalhamento da SMA; depois da compactação não devem influenciar no desempenho da mistura. No entanto, algumas propriedades dos inibidores têm sido associadas a um ganho de resistência à deformação plástica a temperaturas mais elevadas, à redução do envelhecimento do ligante, a um aumento da resistência à fadiga e a um acréscimo da durabilidade, proporcionando vida útil mais longa. (EAPA, 1998).

Pelo fato das fibras impedirem o escorrimento do ligante durante o armazenamento, transporte e aplicação do SMA, o uso delas possibilita um maior teor de ligante, o que gera uma película mais espessa ao redor do agregado, retardando a oxidação, a penetração de umidade e

a separação dos agregados. Essas vantagens servem para proteger a mistura asfáltica do desgaste (NEVES FILHO, 2004).

Segundo EAPA (1998) a quantidade necessária de inibidor é baseada na experiência prática. No entanto, nos Países Baixos um método de ensaio para medir a capacidade de inibir a drenagem de vários materiais tem sido desenvolvido e na Alemanha o teste Schellenberg é utilizado e tem mostrado bons resultados.

A mistura SMA tem como principais características positivas (MOURÃO, 2003; BLAZEJOWSKI, 2010; EAPA, 1998; BERNUCCI et al., 2008):

- boa estabilidade a elevadas temperaturas – devido ao melhor atrito interno gerado pelo esqueleto mineral entre os agregados;
- boa flexibilidade a baixas temperaturas – devido ao mástique rico em ligante, proporcionando melhores propriedades em relação às misturas tradicionais com relação a trincas térmicas;
- pouca permeabilidade – devido ao baixo índice de vazios, que também tem satisfatória resistência ao envelhecimento, baixa sensibilidade à umidade e alta durabilidade;
- elevada adesividade entre os agregados minerais e ligante – devido a elevada quantidade de fíler e as fibras estabilizantes, que tem a função de estabilizar a mistura, engrossando o filme de ligante e melhorando a adesividade agregado/ligante;
- boa resistência à derrapagem e redução do efeito “spray” gerado pelo tráfego em pistas molhadas – devido a boa macrotextura formada pelo agregado graúdo e o mástique na superfície do pavimento;
- melhoria na visibilidade – ao impedir que se forme uma lâmina d’água sobre os pavimentos, o SMA reduz o reflexo dos faróis dos veículos que trafegam no sentido contrário, aumentando a visibilidade da sinalização no pavimento.;
- melhor aderência pneu/pavimento – sua granulometria descontínua forma uma textura superficial que retém a água da chuva, impedindo que a mesma permaneça na superfície de rolamento, favorecendo o contato pneu/pavimento e aumentando a segurança em dias de chuva;
- redução do nível de ruído – devido às propriedades da textura superficial da mistura em relação às misturas asfálticas densas convencionais;
- maior vida de serviço em relação às misturas asfálticas densas contínuas – devido ao aumento da resistência à deterioração da superfície e melhoria da uniformidade / resistência à deformação permanente;

Por suas características, a SMA pode ser utilizado como camada de rolamento em pavimentos sujeitos a tráfego intenso e de grandes solicitações. Segundo Bernucci et al. (2008) a aplicação da SMA é adequada em vias com alta frequência de caminhões, em áreas de carregamento e descarregamento de cargas, em rampas, pontes, paradas de ônibus, faixa de ônibus, em pistas de aeroporto, estacionamentos e portos. Na Europa é utilizada para renovar a condição de aderência do pavimento ou manutenção de pavimentos existentes por meio de camadas delgadas de 20 mm a 30 mm (NAPA, 2002).

Entretanto, apesar das características positivas mencionadas, a mistura SMA possui características negativas, entre elas pode-se citar (BLAZEJOWSKI, 2010):

- baixa resistência à derrapagem inicial – devido ao fino filme de asfalto sobre os agregados na superfície, ao menos que se realize aplicação de “gritting”, que consiste na aplicação de uma taxa de areia graduada sobre o pavimento durante a segunda passagem do rolo na compactação.
- custo inicial maior, se comparado às misturas densas tradicionais – devido ao elevado teor de betume (>6%), fíler (~10%) e fibra estabilizante, mas devido a maior vida de serviço, o custo benefício o torna viável;
- risco de aparecimento de diferentes tipos de exsudação – devido a erros ou variações do projeto, produção e lançamento da mistura.

2.2.3 Especificações para a mistura asfáltica SMA

Existem na atualidade algumas normas e especificações da SMA, seja na Europa, como nos Estados Unidos e Canadá, além daquelas nos países orientais. Segundo Bernucci et al. (2008) a especificação alemã (ZTV Asphalt - StB) foi a primeira a ser publicada como norma, em 1984, e engloba quatro tipos de SMA, denominados de 0/11S; 0/8S; 0/8 e 0/5, sendo o último algarismo referente ao diâmetro nominal máximo do agregado (onde até 10% no máximo ficam retidos em peneira desse tamanho), conforme mostrado na Tabela 1. Para tráfego pesado ou solicitações especiais, as especificações restringem-se às faixas 0/11S e 0/8S.

Bernucci et al. (2008) afirmam que na União Européia existem outras faixas sugeridas, incluindo diâmetros nominais reduzidos, como 4 e 6mm, ou mesmo muito maiores, como 16, 19 ou ainda 25mm.

A norma alemã ainda estabelece requisitos para a SMA e apresenta informações importantes para camadas de rolamento e de nivelamento a serem executadas com esse tipo de mistura, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 1: Faixas granulométricas para a SMA pela especificação alemã
(ZTV Asphalt - StB 94, 2001)

Peneira	Faixas			
	Porcentagem em massa			
	SMA 0/11S	SMA 0/8S	SMA 0/8	SMA 0/5
< 0,09mm	9-13	10-13	8-13	8-13
> 2mm	73-80	73-80	70-80	60-70
> 5mm	60-70	55-70	45-70	<10
> 8mm	>40	<10	<10	-
> 11,2mm	<10	-	-	-

Tabela 2: Requisitos para a SMA pela especificação alemã
(ZTV Asphalt - StB 94, 2001)

Características e Requisitos				
Tipo de asfalto ¹	B65 ou PmB45	B65 ou PmB45	B 80	B80 ou B20
Teor de asfalto na mistura, % em peso	> 6,5	>7,0	>7,0	>7,2
Fibras na mistura, % em peso	0,3 a 1,5			
Dosagem	Marshall (50 golpes por face)			
Temperatura de compactação, °C	135°C ± 5°C (para PmB deve ser 145°C ± 5°C)			
Volume de vazios, %	3,0-4,0	3,0-4,0	2,0-4,0	2,0-4,0
Camada de rolamento				
Espessura, mm	35-40	30-40	20-40	15-30
Consumo, kg/m ²	85-100	70-100	45-100	35-75
Camada de nivelamento				
Espessura, mm	25-50	20-40	-	-
Consumo, kg/m ²	60-125	45-100	-	-
Grau de compactação	>97%			
Volume de vazios da camada compactada	<6,0%			

¹ A designação B corresponde a asfaltos convencionais e o número significa a penetração; PmB são modificados por polímeros. Os asfaltos polímeros (PmB45) são recomendados para solicitações especiais.

A especificação norte-americana da SMA segue a norma da AASHTO MP 8-02/01 que recomenda três faixas granulométricas, conforme mostrado na Tabela 3. As propriedades da mistura são ditadas por especificações, mostradas na Tabela 4, obtidas no equipamento de compactação giratório SUPERPAVE.

Conforme afirma Bernucci et al. (2008) as faixas com diâmetro nominal máximo de 19mm e 12,5mm são as mais empregadas nos Estados Unidos. A faixa com tamanho nominal máximo de 9,5mm tem sido a adotada recentemente e há uma tendência de aumentar seu emprego nos próximos anos.

Tabela 3: Faixas granulométricas da mistura SMA segundo AASHTO MP 8-02/01

Abertura (mm)	Faixas					
	Porcentagem em massa, passando					
	19,0mm		12,5mm		9,5mm	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx
25		100	-	-	-	-
19	90	100	-	100	-	-
12,5	50	88	90	99	-	-
9,5	25	60	50	85	100	100
4,75	20	28	20	40	70	95
2,36	16	24	16	28	30	50
1,18	-	-	-	-	20	30
0,6	-	-	-	-	-	21
0,3	-	-	-	-	-	18
0,075	8	11	8	11	-	15

Tabela 4: Características e propriedades da mistura SMA segundo AASHTO MP 8-02/01

Propriedades	Requisito para corpos-de-prova compactados no equipamento giratório - SUPERPAVE
Volume de vazios (%)	4,0 ²
VAM (vazios no agregado mineral), % mín.	17
VCAmix ³	<VCAdrc ³
Estabilidade Marshall, N, mín	6200 ⁴
RRT - Resistência à tração retida (AASHTO T 283/1989), % mín	70
Teste de escorrimento (draindown) na temperatura de produção ⁵ , % em peso máx.	0,3
Teor de asfalto na mistura, % mín.	6

No Brasil ainda não existe uma norma para a mistura do tipo SMA. O Departamento de Estradas e Rodagens do estado de São Paulo propôs, em 2006, uma normalização técnica de camada de rolamento de SMA com o objetivo de definir os critérios para orientar os processos de produção, execução, aceitação e medição dos serviços de mistura asfáltica tipo SMA em obras rodoviárias. A especificação entrou em vigor no ano de 2007, com o nome ET-DE-P00/031 – Concreto Asfáltico tipo SMA, e discorre sobre os materiais que devem compor a mistura SMA, equipamentos, execução, controle, aceitação e critérios de medição e pagamento.

Segundo a especificação ET-DE-P00/031 os materiais constituintes da mistura asfáltica tipos SMA devem ser agregados graúdos, agregados miúdos, material de enchimento, fibras de celulose, ligante asfáltico modificado por polímero e, se necessário, melhorador de adesividade.

A ET-DE-P00/031 estabelece que a composição dos agregados da mistura deve satisfazer aos requisitos apresentados na Tabela 5 conforme norma alemã ZTV Asphalt – StB. As faixas I e II são indicadas para tráfego pesado ou solicitações especiais.

² Em locais com clima frio o projeto pode ser realizado para 3,5% de volume de vazios.

³ VCAmix corresponde aos vazios totais do agregado graúdo, e VCAdrc aos vazios com ar requerido + vazios ocupados pela fibra e asfalto + vazios ocupados pelos agregados miúdos.

⁴ Valor sugerido da prática.

⁵ Escorrimento segundo AASHTO T 305-97.

Tabela 5: Faixas granulométricas da mistura SMA segundo a ET-DE-P00/031

Peneira de malha quadrada		Designação				Tolerância
ASTM	mm	I	II	III	IV	
3/4"	19	100	-	-	-	±7%
1/2"	12,5	90-100	-	-	-	±7%
3/8"	9,5		100	100	-	±5%
5/16"	7,93	45-60	90-100	90-10	100	±5%
n°4	4,75	30-40	30-45	30-52	90-100	±5%
n°10	2	20-27	20-27	20-30	30-40	±5%
n°200	0,075	9-13	9-13	7-12	7-12	±2%
Espessura (cm)		3,5-5,0	3,0-4,0	2,5-3,5	1,5-2,5	-

Pelo fato da resistência da SMA está intimamente ligada à maior interação dos grãos da sua elevada porcentagem de agregados graúdos, a maioria das agências colocou requisitos mais rigorosos quanto às características desse componente da mistura.

Os agregados, em praticamente todos os países, são obrigatoriamente 100% britados, com poucas exceções, devendo a fração graúda ser de preferência cúbica e apresentar 100% de suas partículas fraturadas em pelo menos uma face e 90% em duas faces, conforme a ASTM D 5821-13. Os norte-americanos e os alemães, têm especificado abrasão Los Angeles $\leq 30\%$, porém há casos de sucesso com agregados britados cuja abrasão excedeu 50%. A absorção deve ser $\leq 2\%$ e o ataque aos sulfatos de sódio de $\leq 15\%$ e de magnésio de $\leq 20\%$, ambos após 5 ciclo, conforme AASHTO T 104. As Tabela 6 e na Tabela 7 apresentam os requisitos de qualidade para o agregado graúdo e miúdo.

Tabela 6: Requisitos de qualidade para os agregados graúdos das misturas asfálticas SMA

Ensaio	Critério	Método	mín	Máx
Abrasão Los Angeles, %	-	DNER-ME 035/98	-	30 ⁶
Partículas Planas e Achatadas, % ⁷	3:1	ASTM D4791-10	-	20
	5:1		-	5
Absorção, %	-	DNER-ME 195/97	-	2
Durabilidade (5 ciclos), %	Sulfato de Sódio	AASHTO T104	-	15
	Sulfato de Magnésio		-	20
Partículas fraturadas, % ⁸	Uma face	ASTM D5821-13	100	-
	Duas faces		90	-

Tabela 7: Requisitos de qualidade para os agregados miúdos das misturas asfálticas SMA

Ensaio	Critério	Método	mín	Máx
Durabilidade (5 ciclos), %	Sulfato de Sódio	AASHTO T104	15	15
	Sulfato de Magnésio		20	20
Índice de Plasticidade, %	-	AASHTO T 90	Não plástico	

Não há consenso nas especificações dos ligantes asfálticos, que são em geral não-restritivas, empregando tanto os asfaltos modificados por polímeros como asfaltos convencionais. As fibras são geralmente orgânicas (de celulose) ou minerais, e são adicionadas durante a usinagem para evitar a segregação da mistura em seu transporte, facilitar a aplicação e evitar o escorrimento do ligante asfáltico (NAPA, 2002).

As fibras orgânicas podem ser utilizadas também em pellets ou agregações. Em alguns casos vêm impregnadas de ligante asfáltico para facilitar sua homogeneização na usinagem, contendo em geral 1:2 de ligante para fibras. Em alguns países são utilizadas fibras de vidro. Há diversas experiências com sucesso sem uso de fibras, porém em geral com uso de ligantes modificados (SOREN, 2012).

⁶ Agregados com valores mais elevados de Abrasão Los Angeles foram utilizados com sucesso para produzir misturas SMA. No entanto, quando a abrasão de L.A. excede 30% de perda, pode ocorrer uma quebra excessiva no processo de compactação de laboratório ou durante a compactação em campo.

⁷ Os critérios de partículas planas e alongadas aplicam-se à mistura de agregados de projeto.

⁸ Pode-se utilizar sulfato de sódio ou sulfato de magnésio. Não há uma exigência para executar ambos os métodos

2.3 Principais parâmetros das fibras usadas em materiais compósitos

Segundo Souza (2010) misturas asfálticas modificadas por adição de fibras têm seu estudo entrelaçado com a teoria de materiais compósitos. De maneira geral, materiais compósitos são aqueles formados pela combinação de dois ou mais materiais (neste caso, as fibras e a matriz em que as mesmas estão incluídas), constituindo um conjunto polifásico, sendo as propriedades do conjunto superior à de seus componentes em separado (BENTO, 2006).

Os principais parâmetros das fibras relacionados ao desempenho de compósitos cimentados reforçados com esse tipo de material, são os seguintes (TAYLOR, 1994 apud CASAGRANDE, 2001; BERNARDI, 2003; BENTO, 2006; JAHROMI & KHODAILI, 2008):

- teor de fibra: as propriedades mecânicas dos compósitos são inerentes ao teor de fibra adicionado, uma vez que as fibras representam o componente estrutural. Inicialmente, quanto maior o teor melhor será o desempenho do compósito, pois maior será o número de fibras que intercepta cada microfissura, evitando assim, sua propagação e permitindo o controle da fissuração. O aumento do teor de fibra pode ainda gerar um aumento do módulo de elasticidade e da tensão de ruptura máxima do compósito, pois as fibras passam a absorver os esforços impostos à matriz, absorvendo parte das tensões internas e contribuindo para a melhoria das propriedades mecânicas do compósito. Entretanto, a adição de fibras não deve ser feita indiscriminadamente, mas procurando um teor ótimo;
- módulo de elasticidade da fibra: um alto valor do módulo de elasticidade causaria um efeito similar ao teor de fibra, mas, na prática, quanto maior o módulo maior a probabilidade de haver o arrancamento das fibras;
- aderência entre a fibra e a matriz: as características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos cimentados reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz. Uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito;
- resistência da fibra: aumentando a resistência das fibras, aumenta também a ductilidade do compósito, assumindo que não ocorra o rompimento das ligações de aderência.
- comprimento da fibra: se as fibras são muito longas, pode criar o chamado balling, ou seja, algumas das fibras podem agrupar-se não se misturando bem ao concreto asfáltico. Se as fibras são muito curtas, podem não fornecer qualquer efeito de reforço, servindo apenas como um material de enchimento na mistura;

- orientação das fibras: fibras orientadas aleatoriamente podem proporcionar comportamento isotrópico e melhoras nas propriedades mecânicas podem não ser alcançadas. Quando um composto é criado utilizando um alinhamento unidirecional das fibras, podem-se alcançar ótimos valores de tensão e rigidez, caso o carregamento seja aplicado paralelamente à direção das fibras. Entretanto, estas propriedades ficam reduzidas caso o carregamento seja aplicado de maneira perpendicular à direção das fibras. Os compostos formados por fibras longas apresentam um grande grau de orientação, uma vez que as fibras tendem a alinhar-se na direção maior. Já os compósitos de fibras curtas apresentam fibras orientadas em diversas direções, podendo, entretanto, apresentar uma orientação predominante, devido aos processos de mistura e adensamento;
- ligação e falha: se a fibra expande-se e contrai-se num índice muito diferente da matriz, as ligações podem ser rompidas e falhas prematuras podem ocorrer. Este fato pode acontecer em misturas asfálticas, onde a temperatura que se desenvolve no interior da mesma é muito alta, sendo necessária uma boa compatibilidade entre os coeficientes de expansão térmica da fibra e da massa asfáltica, a fim de que não prejudique o bom desempenho do compósito.

2.4 Utilização de fibras como aditivo estabilizador

Com a popularização e o avanço da engenharia de fibras, nacionalmente e internacionalmente vem se conduzindo pesquisas no uso de fibras em duas áreas da engenharia, principalmente: (i) geotecnia, com estudos de reforço em solos de fundação e de camadas de pavimentação (revestimentos e base) e (ii) estruturas, com a adição de fibras em concretos de cimento Portland (Souza, 2010).

As fibras como aditivos estabilizadores em misturas asfálticas SMA apresentam como principais propriedades o poder de absorver ligante evitando o problema do escorrimento e de não enfraquecer a mistura asfáltica. Segundo Mourão (2003) as fibras ainda fazem com que o ligante asfáltico fique mais consistente a altas temperaturas, diminuindo a formação dos afundamentos de trilha de roda e conforme afirma Martinho et al. (2013) ajudam no revestimento dos agregados, ou seja, proporcionam a formação de uma camada de ligante com espessura constante.

Hagos (2008) cita duas características principais que as fibras devem apresentar para serem aplicadas em misturas asfálticas:

- as fibras devem ser fortes e de tamanho adequado para formar uma rede no interior da mistura asfáltica. Se a fibra for muito curta pode funcionar como um fíler, não desempenhando a função de controlar o aparecimento de trincas. Por outro lado, se a fibra for muito longa pode causar problemas de mistura;
- as fibras devem ser dúcteis e suficientemente duras para resistir aos esforços cíclicos do tráfego.

Blazejowski (2011) cita os tipos de fibras que podem ser utilizadas como aditivo estabilizador em SMA, por exemplo:

- fibras de celulose, que são as mais utilizadas;
- fibras de pseudo-celulose feitas a partir de papel inutilizado;
- fibras minerais, desenvolvidas a partir da fusão de alguns tipos de rochas (como lã de rocha);
- celulose-mineral, que é uma mistura de celulose com fibras minerais;
- celulose-polímero, que é uma mistura de celulose com diferentes tipos de polímeros e em teores variados;
- celulose-cera, que é uma mistura de celulose com ceras sintéticas, que além de funcionarem como estabilizadores alteram viscosidade do ligante asfáltico;
- têxteis, obtidas por meio do processamento e fragmentação de rejeitos têxteis;
- plásticas, e.g. polipropileno;
- fibra de vidro em forma de fios (como lã de vidro) e
- outros tipos, e.g. pó de couro, fibras de coco, etc.

As fibras de celulose e minerais são as mais comumente utilizadas na Europa e na América do Norte correspondendo a 0,3% em peso do total da mistura no caso europeu, e a 0,3 – 0,4% no norte-americano. Do ponto de vista funcional, as fibras de celulose apresentam vantagens em relação às minerais por serem totalmente inócuas à saúde e serem produzidas a partir de fontes renováveis (VALE, 2007).

Segundo Blazejowski (2011) a diferença entre as fibras está no seu poder de absorver ligante, onde atualmente as fibras de celulose são conhecidas por possuir a maior eficiência de absorção e conseqüentemente maior capacidade de atenuar o escorrimento, o que pode ser observado nas recomendações finlandesas para adição de fibras em SMA (Tabela 8) onde o menor teor corresponde às fibras de celulose.

NCHRP (2015) estudou o uso de fibras em misturas asfálticas e sintetizou no Quadro 1 as vantagens e desvantagens dos tipos de fibras mais utilizadas.

A crescente importância da sustentabilidade na construção civil levou ao aumento do interesse na reutilização de materiais que seriam descartados, incluindo fibras residuais de uma variedade de fontes, naturais e artificiais. NCHRP (2015) afirma que as vantagens de fibras naturais incluem baixo custo, resistência e propriedades mecânicas aceitáveis e sustentabilidade. A desvantagem desta é a sua tendência de absorver a umidade, o que pode causar-lhes um inchaço e pode interferir na ligação do asfalto hidrofóbico com a fibra carregada de umidade. As fibras naturais também podem degradar a altas temperaturas ou condições de umidade, sendo necessários tratamentos de superfície para melhorar a compatibilidade da fibra com o asfalto.

Tabela 8: Recomendações finlandesas para adição de fibras em misturas asfálticas

Tipo de Fibra	Faixa recomendada na mistura (%)
Celulose	0,3 – 0,5
Mineral	0,7 – 0,9
Vidro	0,4 – 0,6

Fonte: PANK (1995) apud MOURÃO (2003)

Quadro 1: Vantagens e desvantagens relatadas dos tipos comuns de fibras

Tipo de fibra	Vantagens relatadas	Desvantagens relatadas
Celulose	<ul style="list-style-type: none"> •absorve o ligante, permitindo a utilização de um alto teor asfalto. •pode ser feita a partir de uma variedade de materiais vegetais. <ul style="list-style-type: none"> •amplamente disponível; •pode ser feita a partir de materiais reciclados; 	<ul style="list-style-type: none"> •alta absorção de ligante pode encarecer a mistura; •resistência à tração baixa;
Mineral	<ul style="list-style-type: none"> •não é tão absorvente quanto à de celulose. •eletricamente condutoras, têm sido utilizados para fins de aquecimento ou de degelo e para promover a cicatrização de fissuras; 	<ul style="list-style-type: none"> •algumas podem corroer ou degradar devido a condições de umidade; •podem criar misturas muito rígidas difíceis de compactar e podem ser agressivas, causando danos nos pneus se usadas em superfícies.
Poliéster	<ul style="list-style-type: none"> •resistente à fadiga e ao aparecimento de fissuras; •aumenta a estabilidade da mistura; •ponto de fusão superior ao polipropileno. <ul style="list-style-type: none"> •alta resistência à tração. 	<ul style="list-style-type: none"> •maior massa específica, significando menos fibras por unidade de peso adicionado; •custo-benefício não comprovado / variado.
Polipropileno	<ul style="list-style-type: none"> •reduz o afundamento e as rachaduras; •derivados do petróleo, de modo compatível com o asfalto. <ul style="list-style-type: none"> •dispersa-se facilmente em asfalto. <ul style="list-style-type: none"> • resistente a ácidos e sais. •baixo peso específico significa mais fibras por unidade peso adicional. 	<ul style="list-style-type: none"> •menor ponto de fusão do que alguns outros materiais de fibra, requerendo controle de temperaturas de produção. <ul style="list-style-type: none"> •começa a encurtar a 149 ° C. •custo-benefício não comprovado / variado.
Aramida	<ul style="list-style-type: none"> •resiste a rachaduras, afundamentos, e surgimento de buracos. •aumenta a estabilidade da mistura; <ul style="list-style-type: none"> •alta resistência à tração. •pode contrair-se a temperatura mais elevada, o que pode ajudar a resistir aos afundamentos. 	<ul style="list-style-type: none"> •custo-benefício não comprovado / variado.
Aramida e poliolefina	<ul style="list-style-type: none"> •controla afundamentos e rachaduras; •combina benefícios das fibras de aramida e poliolefinas (polipropileno). 	<ul style="list-style-type: none"> •custo-benefício não comprovado / variado;
Fibra de vidro	<ul style="list-style-type: none"> •alta resistência à tração; •baixo alongamento; •recuperação elástica alta; •ponto de amolecimento alto; 	<ul style="list-style-type: none"> •frágil; •podem quebrar onde elas se cruzam; •podem quebrar durante a mistura e a compactação. •custo-benefício não comprovado / variado;

Fonte: NCHRP (2015)

2.5 Experiências com fibras naturais em misturas asfálticas SMA

Os resíduos de vegetais, resultantes de processos agroindustriais vêm indicando uma grande potencialidade para fabricação de compósitos. Os resíduos gerados pela agroindústria podem constituir em importante fonte de matéria prima para produção de novos materiais, dependendo das quantidades disponíveis e dispersão geográfica (AQUINO, 2003).

De acordo com Martin et al. (2009) a utilização das fibras naturais apresenta vantagens, em relação as sintéticas, principalmente por ser biodegradável, atóxica, de fonte renovável e por apresentar baixo custo, o que condiz com os atuais esforços de proteção ao meio ambiente.

Vale (2007) verificou a viabilidade do uso de fibras de coco com tamanho de 30mm em misturas asfálticas SMA AASHTO-12,5mm, comparando-as com misturas asfálticas SMA AASHTO-12,5mm com fibra de celulose e sem fibra. Os resultados do ensaio de escorrimento mostraram que a exigência da AASHTO MP 8-02/01 (escorrimento máximo de 0,3%) foi atendida com a incorporação de fibras de coco e de celulose no teor de 0,5% e 0,3% respectivamente, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados do ensaio de escorrimento para SMA com fibra de coco

Fibra	Teor (%)	Escorrimento (%)	
		T=165°C	T=180°C
Sem fibra	0,0	1,06	0,70
Coco	0,3	0,31	0,30
	0,5	0,08	0,25
	0,7	0,04	0,09
Celulose	0,3	0,01	0,03
	0,5	0,01	0,02

Fonte: Adaptado de Vale (2007)

Com o teor de 0,5% de fibra de coco e de 0,3% de fibra de celulose foram confeccionados os corpos de prova, compactados pelo método Marshall e SUPERPAVE, destinados aos ensaios mecânicos de resistência à tração estática por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga por compressão diametral à tensão controlada e resistência à tração retida por umidade induzida, cujos resultados encontram-se na Tabela 10.

Nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência as misturas asfálticas SMA dosadas pela metodologia SUPERPAVE apresentaram valores superiores às misturas dosadas pela metodologia Marshall, segundo o autor muito provavelmente devido ao envelhecimento de curto prazo sofrido pelas primeiras.

As resistências à tração retida por umidade induzida das misturas SMA com fibra de coco foram superiores a 70%, que deve ser o valor mínimo para que a amostra seja aprovada. A resistência à tração e a resistência à tração retida das misturas com fibra (de coco e de

celulose) foram superiores às da mistura sem fibra e o inverso foi verificado nos resultados de módulo de resiliência.

Vale (2007) observou no ensaio de fadiga uma grande variação nos valores de N (ciclos) para um mesmo nível de tensões com o emprego da fibra de coco na mistura SMA, sendo a heterogeneidade das misturas, promovidas pelas fibras de coco durante a confecção dos corpos de prova, uma das justificativas apresentadas para este comportamento. O comprimento de 30mm fez com que houvesse a formação de gomos na mistura, dificultando assim sua trabalhabilidade. Segundo ele, essas variações elevadas não permitiram avaliar corretamente se a incorporação das fibras de coco melhorou ou prejudicou o comportamento das misturas. Por meio dos seus estudos, o autor concluiu que a fibra de coco deve ter um tamanho máximo de 20 mm.

Tabela 10: Propriedades mecânicas da mistura asfáltica SMA com fibra de coco

Ensaio	Método de compactação	Fibra de coco	Fibra de celulose	Sem fibra
Resistência à tração (MPa)	Marshall	0,76	0,67	0,56
	SUPERPAVE	1,11	1,14	1,04
Resistência à tração retida (%)	Marshall	91	71	50
	SUPERPAVE	87	91	56
Módulo de resiliência (MPa)	Marshall	2689	3184	3423
	SUPERPAVE	4003	4111	4340

Fonte: Adaptado de Vale (2007)

Leal (2013) utilizando dois ligantes diferentes (um asfalto modificado por borracha moída de pneus e um CAP 30/45) confeccionou misturas SMA NAPA-9,5mm com a adição de 0,3% de bagaço de cana de açúcar com dimensões < 1,2 mm, < 0,6 mm e < 0,3 mm, obtidas por peneiramento. O autor constatou que os valores de escorrimento de ambos os ligantes ficaram abaixo do máximo especificado para as misturas SMA (0,3%) e que houve uma tendência do percentual de escorrimento diminuir à medida que a dimensão da fibra de bagaço de cana aumentava, conforme mostrado na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados do ensaio de escorrimento para misturas asfálticas SMA com bagaço de cana de açúcar

Aditivo	Escorrimento (%)	
	CAP AMB	CAP 30/45
0,6mm < Bagaço de cana < 1,2mm	0,029	0,018
0,3mm < Bagaço de cana < 0,6mm	0,033	0,021
Bagaço de cana < 0,3 mm	0,044	0,027

Fonte: Adaptado de Leal (2013)

Leal (2013) avaliou as propriedades mecânicas da mistura SMA produzida com bagaço de cana de açúcar (0,6 < comprimento < 1,2mm) e das misturas SMA com a adição de fibras de celulose, ambas utilizando o asfalto modificado por borracha moída de pneus (Tabela 12). O autor percebeu resultados semelhantes de estabilidade Marshall e de resistência à tração, sendo a resistência à tração para a mistura produzida com o bagaço de cana de açúcar um pouco superior. A resistência à tração retida apresentou resultados satisfatórios e parecidos para as duas misturas SMA, e o resultado do ensaio de desgaste Cântabro não sofreu nenhuma alteração devido à adição do bagaço de cana de açúcar em substituição à fibra de celulose. Com relação ao ensaio de módulo de resiliência o autor concluiu que o tipo de fibra não proporcionou mudança significativa dos resultados.

Tabela 12: Propriedades mecânicas da mistura asfáltica SMA com bagaço de cana de açúcar

Ensaio	Fibra de celulose	Bagaço de cana
Estabilidade Marshall (kPa)	11,35	11,15
Resistência à Tração (MPa)	1,22	1,31
Desgaste Cântabro (%)	4,8	5,0
Resistência à tração retida (%)	97,0	97,2
Módulo de Resiliência (MPa)	2252	2468

Fonte: Adaptado de Leal (2013)

Kumar et al. (2011) realizaram uma pesquisa sobre fibras de juta revestidas como uma alternativa às fibras sintéticas usadas convencionalmente em misturas SMA na Índia. Os resultados de escorrimento mostrados na Tabela 13 indicaram que o teor de fibra de 0,3%

fez com que a mistura atendesse ao limite especificado. Os parâmetros mecânicos encontrados por Kumar et al. (2011) para a mistura estão na Tabela 14.

Tabela 13: Resultados do ensaio de escorrimento para misturas asfálticas SMA com fibra sintética e com fibra de juta

Teor (%)	Escorrimento (%)	
	Fibra sintética	Fibra de juta
0	6,5	6,5
0,1	2,8	1,6
0,2	1,1	0,3
0,3	0,034	0,078

Fonte: Adaptado de Kumar et al. (2011)

Tabela 14: Propriedades mecânicas da mistura asfáltica SMA com fibra sintética e com fibra de juta

Ensaio		Fibra sintética	Fibra de juta
Estabilidade (kN)		7,1	7,4
Resistência à tração retida (%)		97	97
Módulo de resiliência (MPa)	35°C	647	508
	25°C	1269	1018
Creep dinâmico (deformação acumulada %)	40°C	7,1	6,8
	50°C	6,7	6,2

Fonte: Adaptado de Kumar et al. (2011)

A estabilidade Marshall da SMA com fibra de juta e com fibras sintéticas foram 7,4 kN e 7,1 kN respectivamente, que são superiores ao valor mínimo de 6,2 kN prescrito na norma AASHTO MP 8-02/01, ficando o valor de estabilidade da SMA com fibra natural ligeiramente superior à SMA com fibra sintética. No ensaio de Lottman a relação de resistência à tração da SMA com fibra natural e com fibra sintética foi de 97%, ficando acima do valor mínimo de 70% especificado pela AASHTO MP 8-02/01, indicando, segundo o autor, que ambas as misturas têm boa adesão. O módulo de resiliência da mistura com fibra sintética foi de 1,27 e 1,25 vezes maior do que com a fibra natural nas temperaturas de 35 ° C e 25 ° C respectivamente.

No ensaio de creep dinâmico a deformação acumulada da SMA com fibra de juta foi de 4% e 8% mais baixos em comparação com a SMA com fibra sintética, nas temperaturas de 40°C e 50 °C respectivamente. Sabendo-se que o baixo valor de deformação acumulada no creep dinâmico indica alta susceptibilidade à deformação permanente, o autor concluiu que a SMA com fibra natural tem uma resistência à deformação permanente um pouco menor.

Oda et al. (2012) comparou uma mistura SMA AASHTO 9,5 mm sem fibra utilizando um asfalto modificado por polímero e um asfalto 50/70 com misturas SMA AASHTO 9,5 mm com asfalto 50/70 utilizando poliéster e fibras de celulose, de coco, de sisal. Os resultados de escorrimento (Tabela 15) mostraram que as misturas asfálticas com fibras naturais apresentam excelente desempenho se comparado a mistura com poliéster e com fibras de celulose.

Segundo Oda et al. (2012), quando submetidas à avaliação de parâmetros mecânicos, todas as misturas SMA apresentaram alta resistência à tração e alto módulo de resiliência, com pouca influência sobre o tipo de fibra, conforme pode-se observar na Tabela 16. Os resultados da análise de fadiga (Figura 3), indicaram que a mistura sem fibra com asfalto modificado por polímero teve o melhor comportamento, seguido da mistura com fibra de celulose. De acordo com o autor, os resultados de fadiga obtidos com fibras de celulose, de sisal e de coco não foram significativamente diferentes.

Tabela 15: Resultados do ensaio de escorrimento para misturas asfálticas SMA com poliéster e fibra de sisal, coco e celulose

Fibra	Teor (%)	Escorrimento (%)
Sem fibra	0	0,42
Poliéster	0,3	0,21
	0,5	0,03
Sisal	0,3	0,21
	0,5	0,05
Coco	0,3	0,18
	0,5	0,03
Celulose	0,3	0,11
	0,5	0,07

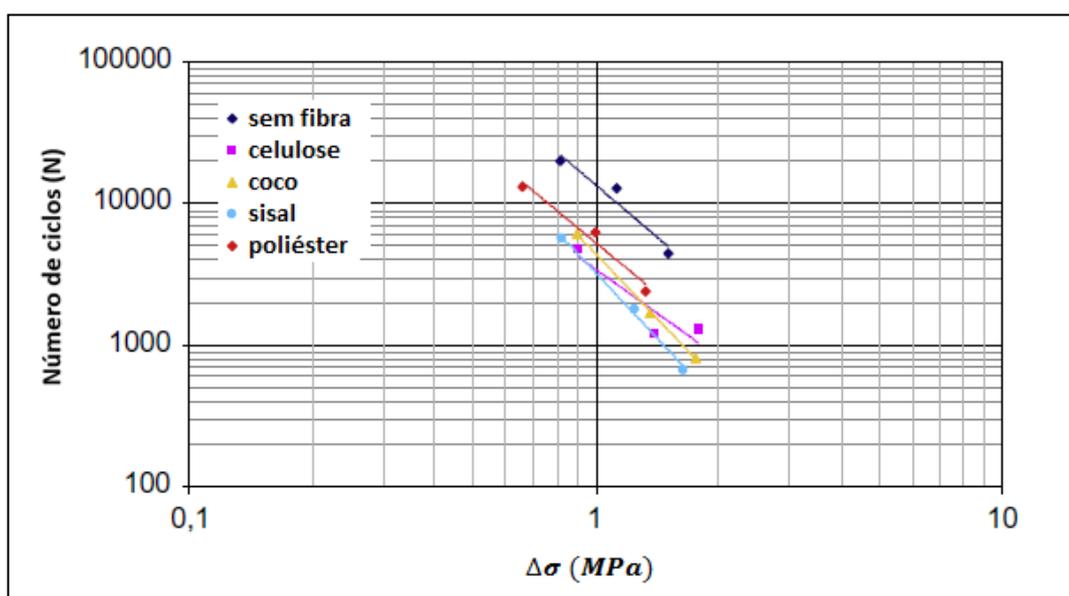
Fonte: Adaptado de Oda et al. (2012)

Tabela 16: Propriedades mecânicas das misturas asfálticas SMA sem fibra, com poliéster e com fibras naturais

SMA	Módulo de resiliência (MPa)	Resistência à tração (MPa)
CAPFLEX B sem fibra	3077	1,1
50/70 sem fibra	7306	0,9
50/70 com fibra de celulose	6417	1,1
50/70 com fibra de coco	7948	1,1
50/70 com fibra de sisal	7193	1,0
50/70 com poliéster	5629	0,8

Fonte: Adaptado de Oda et al. (2012)

Figura 3: Resultado do ensaio de fadiga para as misturas asfálticas SMA sem fibra, com poliéster e com fibras naturais



Fonte: Adaptado de Oda et al. (2012)

Bindu (2012) fez uma comparação entre misturas asfálticas SMA com fibras de coco, sisal e bananeira nos teores de 0,1 a 0,4% em peso de mistura. Os resultados do ensaio de escorrimento (Tabela 17), indicaram que todas as misturas SMA foram estabilizadas pelas fibras a partir do teor de 0,2% devido à natureza absorviva das mesmas e que a fibra de coco foi a melhor dentre as investigadas. Para a confecção das misturas, foi utilizado um teor de 0,3% de fibra por ser mais frequente na literatura.

Tabela 17: Resultados do ensaio de escorrimento para misturas asfálticas SMA com fibra de coco, sisal e bananeira

Teor (%)	Escorrimento (%)		
	Fibra de coco	Fibra de sisal	Fibra de banana
0	6,5	6,5	6,5
0,1	1,89	2,35	2,6
0,2	0,08	0,11	0,12
0,3	0	0,012	0,01
0,4	0	0	0,03

Fonte: Adaptado de Bindu (2012)

A Tabela 18 mostra os parâmetros mecânicos obtidos para a mistura SMA com o teor de fibra de 0,3%. Segundo Bindu (2012) todas as misturas SMA estudadas por ele apresentaram valores de estabilidade e resistência à tração retida superiores aos valores mínimos estabelecidos pela norma AASHTO MP 8-02/01. A SMA estabilizada por fibra de coco exibiu a maior resistência à tração e a maior resistência à compressão e as misturas com fibra de sisal e fibra de banana mostraram quase as mesmas características na estabilização.

Tabela 18: Propriedades mecânicas das misturas asfálticas SMA com fibra de coco, sisal e bananeira

Ensaio		Fibra de coco	Fibra de sisal	Fibra de bananeira
Estabilidade Marshall (kN)		12,58	11,86	11,85
Resistência à tração retida (%)		98,27	97,37	97,68
Resistência à tração (MPa)		1,12	1,11	1,10
Resistência à compressão (MPa)	25°C	5,96	5,79	5,76
	60°C	5,87	5,67	5,57

Fonte: Adaptado de Bindu et al. (2012)

Dikshith (2012) verificou a estabilidade de misturas SMA com a utilização de fibra de bananeira, variando o teor de ligante (4%, 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, 7% em peso de agregado) e utilizando um teor de fibra fixo igual a 0,3% em peso de agregado. Os resultados, mostrados

na Tabela 19, indicaram que o valor da estabilidade aumentou inicialmente com o aumento do teor de asfalto e depois diminuiu gradualmente, tanto para as misturas SMA com fibra como para as misturas SMA sem fibra. Segundo o autor isto pode ser atribuído ao fato de que com o aumento inicial no teor de asfalto, o vínculo asfalto-agregado vai ficando mais forte até certo teor, quando então a carga passa a ser transmitida como uma pressão hidrostática, mantendo a fração entre os pontos de contato de agregados imobilizada, fazendo com que a mistura perca resistência frente à deformação plástica e conseqüentemente o valor da estabilidade cai.

Dikshith (2012) também verificou que para um mesmo teor de ligante as misturas SMA com fibras de banana apresentaram maiores valores de estabilidade em comparação com as misturas sem fibra. Segundo ele, isto pode ser atribuído ao fato de que as fibras nas misturas atuam como estabilizadores que não só preenchem os vazios da amostra, mas também fornecem homogeneidade à mistura e reduzem significativamente o escorrimento, retendo assim o ligante na mistura.

Tabela 19: Resultado do ensaio de estabilidade Marshall (kN) das misturas asfálticas SMA com fibra de bananeira, variando o teor de ligante

Teor de ligante (%)	Sem fibra	Com fibra de bananeira
4,0	7,10	6,89
4,5	8,08	8,21
5,0	7,81	9,9
5,5	7,73	8,0
6,0	6,91	7,6
7,0	6,54	6,0

Fonte: Adaptado de Dikshith (2012)

2.6 A bananeira: concepções econômicas e de cultivo

2.6.1 A prática da bananicultura

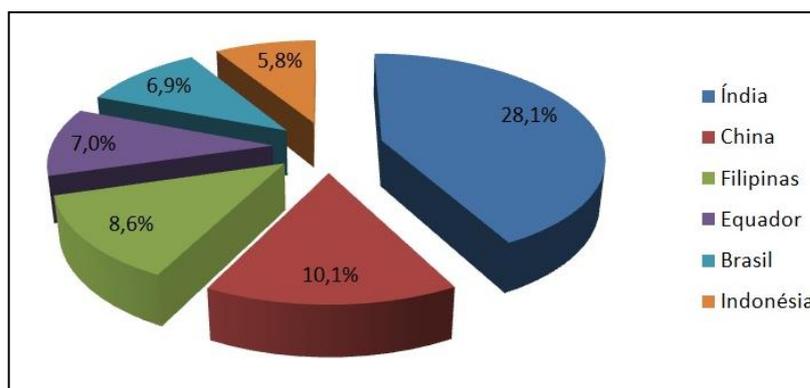
Segundo Vieira (2015) atualmente são mais de 125 países que se dedicam ao cultivo da banana no mundo. Em alguns deles, a atividade se destaca como uma das principais fontes de arrecadação e geração de emprego e renda. O continente asiático lidera a produção dessa fruta,

com 58% do volume produzido; o americano vem em segundo lugar, com 25% (América do Sul, com 17% e a América Central, com 8%); e o africano, em terceiro lugar, com 14%.

A banana é a segunda fruta mais consumida no planeta, com 11,4 kg/hab/ano, perdendo apenas para a laranja, com 12,2 kg/hab/ano. O consumo no continente americano é de 15,2 kg/hab/ano, destacando-se a América do Sul, com 20 kg/hab/ano e a América Central, com 13,9 kg/hab/ano (FAO, 2013).

De acordo com o Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola do governo do Estado de Santa Catarina (CEPA, 2014) a bananicultura tem se expandido bastante na maioria dos países nas três últimas décadas, passando de 35 milhões de toneladas na safra 1978 para quase 107 milhões de toneladas na safra 2011, tendo a Índia como líder da produção no ranking mundial, sendo responsável por 28,1%, seguida da China, com 10,1%, Filipinas, com 8,6%; Equador, com 7,0%; Brasil, com 6,9% (7,3 milhões de toneladas/ano) e Indonésia, com 5,8%, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4: Maiores produtores de banana no mundo

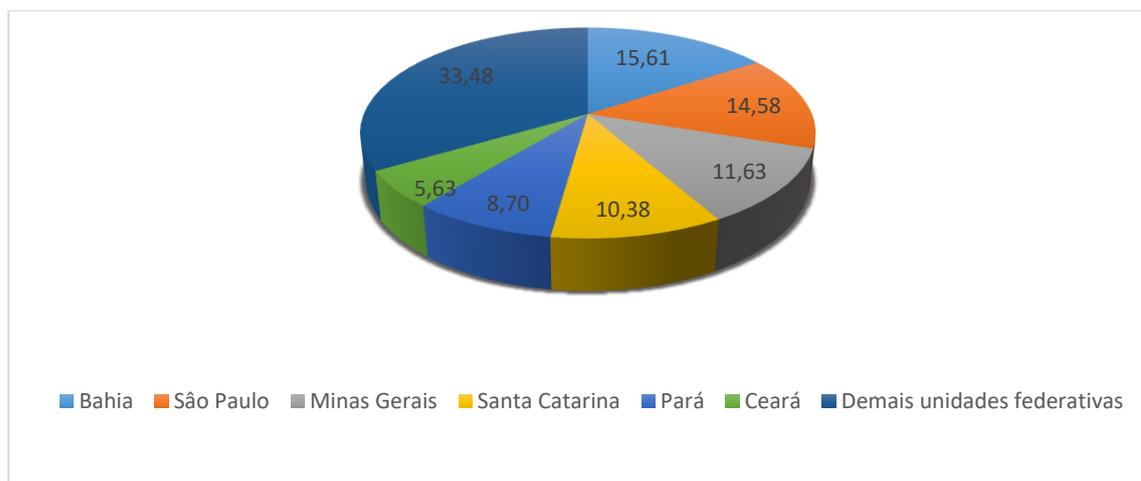


Fonte: CEPA, 2014

A bananicultura é praticada na maioria dos estados brasileiros. As condições de clima (temperatura, umidade relativa, precipitação e insolação) favorecem que a produção seja distribuída durante todo o ano, atendendo, de forma regular, às necessidades de consumo (CEPA, 2014).

De acordo com os dados do IBGE, em 2015 a produção nacional de banana foi de 6,8 milhões de toneladas e as principais Unidades da Federação produtoras do fruto foram a Bahia (15,61%), São Paulo (14,58%), Minas Gerais (11,63%), Santa Catarina (10,38%), Pará (8,70%) e Ceará (5,63%), conforme mostrado na Figura 5.

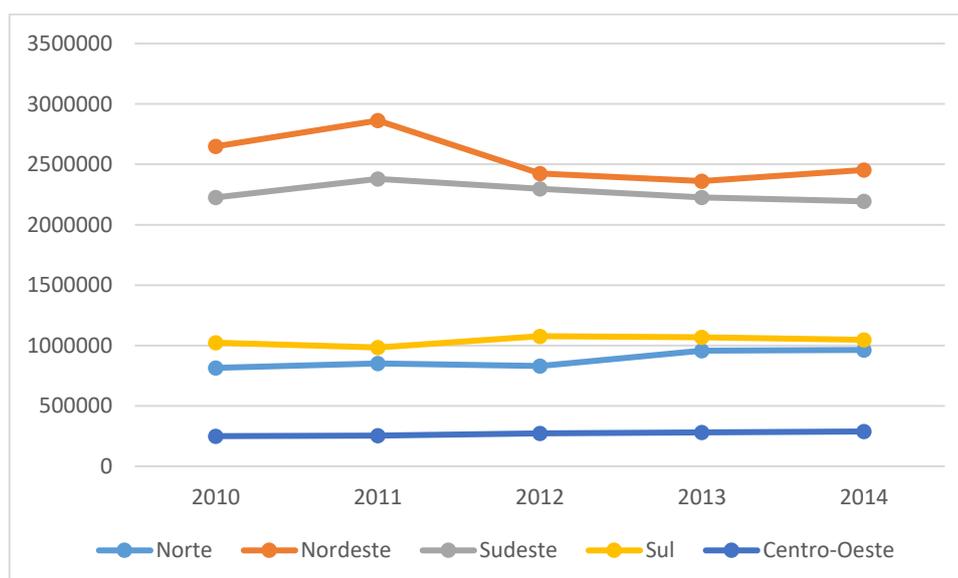
Figura 5: Unidades federativas com as maiores produções de bananas – Quantidade em %



Fonte: Adaptado de IBGE, 2015

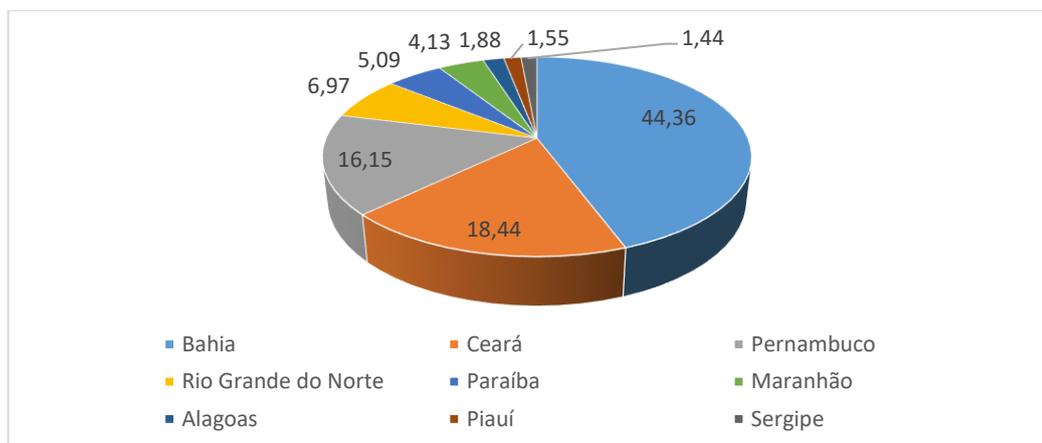
A região Nordeste é a maior produtora brasileira de bananas (Figura 6), produzindo cerca de 2,50 milhões de toneladas no ano de 2014 (IBGE, 2014). O estado da Bahia lidera o ranking com 44,36% do valor da produção regional. As outras quatro posições de maiores produtores de banana do Nordeste são, respectivamente, do Ceará (18,44%), Pernambuco (16,15%), Rio Grande do Norte (6,97%) e Paraíba (5,09) (Figura 7).

Figura 6: Produção de bananas em todas as regiões brasileiras – Quantidade em (t)



Fonte: Adaptado de IBGE, 2014

Figura 7: Produção de bananas em todos os estados nordestinos – Quantidade em (%)



Fonte: Adaptado de IBGE, 2014

As variedades de banana disponíveis no mercado diferem com relação ao uso que delas se faz e às características do seu cultivo. No mercado brasileiro, os cultivares mais importantes são Cavendish (grupo que inclui Nanica, Nanicão e Grande Naine), Prata, Maçã e Ouro. Outras variedades também encontradas com certa frequência são: Prata-Anã, Pacovan, Branca e da Terra. (SEBRAE, 2008)

De acordo com Barbosa et al. (2014) na Paraíba as cultivares mais difundidas são as do tipo Pacovan e Prata (Comum e Anã) que juntas ocupam 95% da área cultivada, embora também se cultive os tipos Cavendish (Grande Naine, Nanica e Nanicão), “Terra” e “Maçã”.

2.6.2 Resíduos da bananicultura

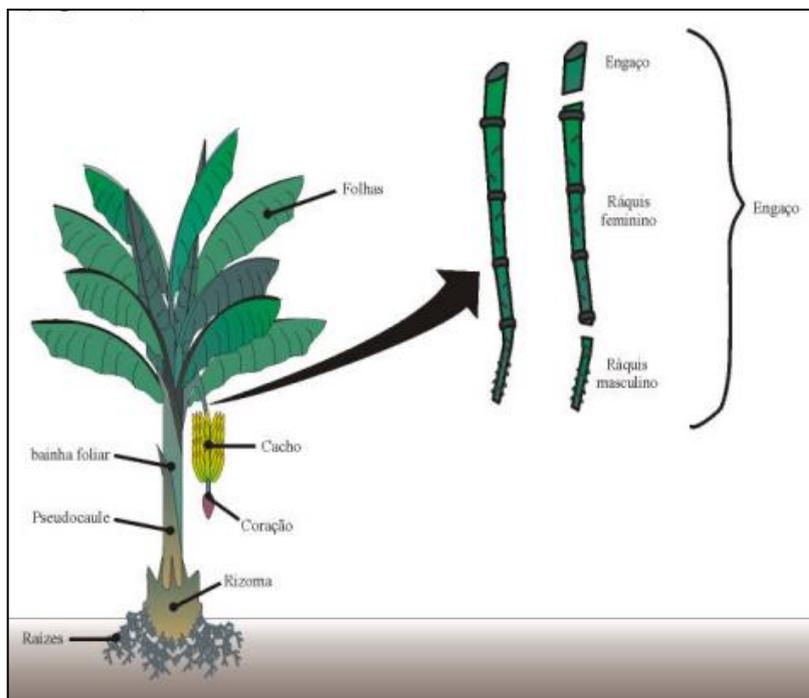
Conforme mostrado na Figura 8, basicamente a bananeira é constituída por raiz, rizoma, pseudocaule, bainhas foliares, folhas e cacho.

Do caule subterrâneo (rizoma) saem as raízes primárias, em grupos de três ou quatro, totalizando 200 a 500 raízes, com espessura predominante menor que 0,5 mm, podendo atingir até 8 mm, sendo brancas e tenras quando novas e saudáveis, tornando-se amarelas e endurecidas com o tempo. O sistema radicular é fasciculado, podendo atingir horizontalmente até 5 m; no entanto, é mais comum de 1 a 2 m, dependendo da variedade e das condições do solo; é também superficial, com aproximadamente 30% localizadas na profundidade de 0-10 cm e 82% concentrando-se na camada de 0-50 cm (BORGES & SOUZA,2004).

O pseudocaule é uma estirpe ou “tronco” em formato de um cilindro irregular, formado por bainhas foliares sobrepostas, tendo em seu interior o “palmito” ou coração central. No

prolongamento das bainhas foliares encontram-se as folhas. O cacho é composto pelas partes: engaço, ráquis, pencas de bananas e botão floral ou “coração” (MEDINA, 1961 apud SOFFNER, 2001).

Figura 8: Partes da bananeira



Fonte: SOFFNER, 2001

De acordo com Gonçalves Filho (2011), após a colheita da banana, são gerados três tipos de resíduos vegetais: pseudocaule, folhas e engaço. Com a industrialização da fruta, dois novos resíduos são produzidos: rejeitos de frutas de má qualidade e descarte de cascas devido ao beneficiamento da polpa.

Na atividade bananicultura, após a colheita da fruta, o cacho é conduzido para outros locais e as outras partes da planta, como o pseudocaule, folhas e coração, normalmente permanecem no bananal. A planta entra em senescência e morre, encerrando o ciclo vegetativo, tornando-se restos de cultura ou resíduo agrícola.

Segundo Soffner (2001) um bananal conduzido de maneira convencional pode fornecer 200 t/ha/ano de restos de cultura, compreendendo pseudocaules, engaços e folhas.

De acordo com dados levantados em uma empresa de alimentos situada no município de Garuva-SC, para cada tonelada de bananas colhidas, 100 kg do fruto são rejeitados e

aproximadamente 4 t de resíduos lignocelulósicos são gerados, sendo 3 t de pseudocaule, 160 kg de engaços, 480 kg de folhas e 440 kg de cascas (GONÇALVES FILHO, 2011).

Segundo Silva (2011), após o corte, o pseudocaule da bananeira pode servir como fonte de matéria-prima para a produção de fios na indústria têxtil, fibras para reforços em compósitos, adubo orgânico, substrato para produção de cogumelos comestíveis, alimentação animal por meio de silagem, e ainda ter suas palhas e fibras provenientes das bainhas foliares utilizadas para produção de produtos artesanais.

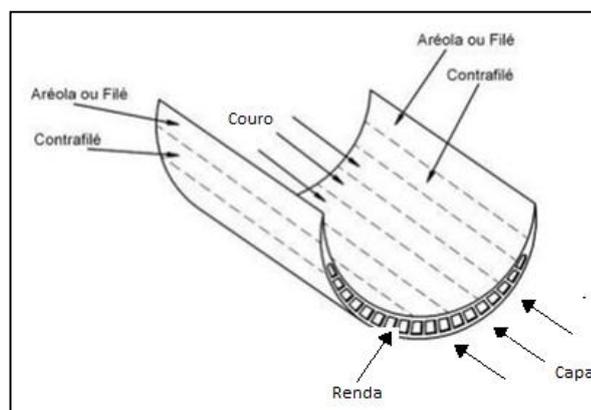
A matéria-prima para o artesanato - palhas e fibras - é extraída do pseudocaule verde, cortado após a colheita do cacho. O material obtido é então trabalhado com técnicas de tecelagem, cestaria e trançados, transformando-se em tapetes, esteiras, cestos, bandejas, acessórios femininos, sandálias, bolsas, revestimentos como cortinas, assentos de cadeiras e objetos diversos de decoração (GARAVELLO, 1999).

2.7 A fibra do pseudocaule da bananeira: alternativa para uso em SMA

A bainha da bananeira produz fibra de boa qualidade com alta durabilidade e resistência. Uma grande quantidade de resíduos é gerada a cada ano devido ao cultivo de banana, que precisa ser descartado. Ao extrair a fibra de banana, os resíduos podem ser efetivamente aproveitados, garantindo um rendimento adicional para os produtores de banana (BINDU & BEENA, 2015).

Do pseudocaule da bananeira cinco tipos de fibras podem ser extraídos, as quais recebem a denominação de filé e contrafilé, capa, couro e renda, conforme mostrado no esquema da Figura 9 todas com características únicas.

Figura 9: Localização de cada tipo de fibra na bainha foliar



Fonte: Adaptado de Scalice, 2009

De acordo com Dikshith (2012) a fibra de bananeira é uma fibra natural e tem suas próprias propriedades físicas e químicas e outras características que a torna uma fibra de fina qualidade. O autor destaca as seguintes características da fibra:

- aparência parece com a fibra de bambu e de rami, mas apresenta propriedades superiores de finura e capacidade de fiação;
- composição química inclui celulose, hemicelulose e lignina;
- altamente resistente e com baixo alongamento;
- pode parecer um pouco brilhante dependendo do tipo de extração e processo de fiação;
- leve e tem forte qualidade de absorção de umidade;
- biodegradável e não tem efeito sobre o meio ambiente e
- a finura média da fibra de banana é de cerca de 2.400 nm.

Segundo Jústiz-Smith et al. (2008) a fibra de bananeira tem mostrado potencial para utilização no desenvolvimento de compósitos estruturais.

As características das palhas da bananeira se diferenciam de acordo com a espécie, variedade, localidade de crescimento da planta, condições edafoclimáticas e tratos culturais, e conforme sua localização no pseudocaule. As bainhas mais externas fornecem palhas mais escuras e mais resistentes, que se tornam mais claras e mais frágeis à medida que se aproximam do centro do mesmo. Após a extração das palhas do pseudocaule, elas podem ser tratadas e colocadas para secar (GARAVELLO, 1999).

Para a obtenção das fibras do pseudocaule da bananeira pode-se utilizar processo manual ou mecânico. No processo de extração manual, após o corte do pseudocaule, as bainhas foliares são retiradas e passadas numa calandra manual (tipo cilindro para massas), para extração da água, após isso são colocadas sobre uma mesa e “penteadas” com garfo ou escova fina de aço para soltar a porção não fibrosa existente entre as fibras. Esse procedimento se repete e depois o material é lavado e pendurado em varal, onde as fibras são separadas com as mãos e deixadas para secar (SILVA, 2011)

No processo de extração por maceração, as bainhas são colocadas em um tanque com água por alguns dias até que as fibras se separem do tecido, entretanto muitas vezes o material se perde por apodrecimento. Para uma fibra de qualidade é recomendável que a água seja de boa qualidade, que a temperatura e a limpeza do tanque sejam adequadas. A extração mecânica da fibra de pseudocaule de bananeira depende de uma máquina desfibradora Figura 10. O rendimento em fibras longas secas comparado ao peso verde do pseudocaule está em torno de 1 a 1,5% por meio deste processo de extração (SILVA, 2011).

Dikshith (2012) e Bindu & Beena (2015) estudaram a utilização da fibra de bananeira em SMA e obtiveram bons resultados no que diz respeito ao escoamento, avaliado pelos três autores, e a algumas propriedades mecânicas (estabilidade, resistência à tração retida, resistência à tração e resistência à compressão), avaliadas pelo primeiro.

Conforme Bindu & Beena (2015) a resistência à tração, alongamento e a densidade são as propriedades mecânicas mais importantes da fibra. A elevada resistência à tração exibida pela fibra indica a sua resistência ao desgaste, facilitando assim a sua utilização em pavimentos. Algumas propriedades da fibra de bananeira obtidas por meio de vários estudos estão mostradas na Tabela 20.

Figura 10: Máquina desfibradora



Fonte: Silva, 2011

Tabela 20: Propriedades da fibra de bananeira

Estudos já realizados	Diâmetro (µm)	Massa específica (g/cm ³)	% Celulose	% Lignina	% Hemicelulose	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento na ruptura (%)	Porosidade Aparente (%)	Resistência à Tração (MPa)
Bindu & Beena (2015)	80 – 250	1,35	65	5		8 – 20	1,0 – 1,2		
Pereira et al. (2011)				11,61	35,57 ± 13,66				
Silva (2011)	131,1 ±17,7	1,35				31,56 ±2,8		86,69	863 ±259,5
El Banna et al., 2011)	Banana São Tomé	55	1,45						2339
	Banana Curauá	100	1,50						1003
Guimarães et al. (2009) (Fibras do pseudocaule da <i>Musa sapientum</i>)			50,15	17,74					
Oliveira et al. (2007) (Fibras do pseudocaule da <i>Musa Cavendish</i>)			37,1	13,3					
Mukhopadhy et al. (2007) apud Silva (2011)			31,27 ±3,61	15,07 ±0,66	14,98 ±2,03				
Reddy e Yang (2005) apud Guimarães (2012)			60-65	5-10	6-8				
Cordeiro et al. (2004) (Fibras do pseudocaule da <i>Musa acuminata</i>)			34,5	12	25,6				
Agopyan (1991) apud Guimarães (2012)		1,03				20-51	2,7		384

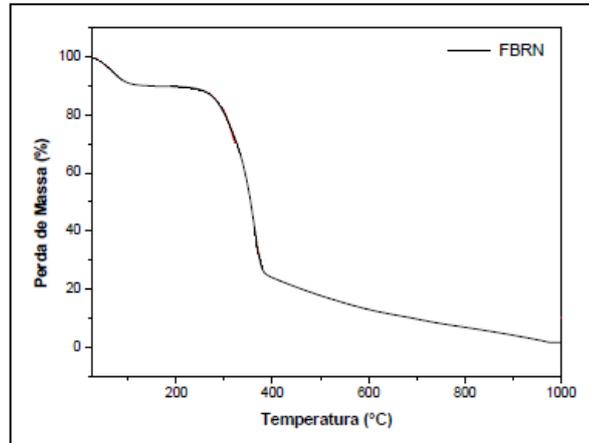
Figueiredo Segundo (2007) estudou a aplicabilidade das fibras da renda da bananeira do tipo Pacovan em misturas SMA, através da avaliação do escorrimento e das propriedades mecânicas da mistura sem e com fibra, nos comprimentos de 5mm e 20mm. A renda é um tipo de fibra de bananeira menos resistente que a fibra da capa que foi usada nessa pesquisa.

Gonçalves et al. (2014) estudou a caracterização físico-química da fibra de bananeira roxa in natura (FBRN) obtida do pseudocaule da planta por meio da TGA, DTA e DRX. Na TGA (Figura 11) verificou-se eventos térmicos associados às perdas de massa, que são representadas pelas inflexões da curva. A perda de massa inicial, que ocorre em aproximadamente 25°C para ambas as amostras, foi atribuída à decomposição de materiais voláteis presentes na fibra celulósica. Esses voláteis podem ser umidade, terpenos, álcoois, ésteres, aldeídos, cetonas, ácidos orgânicos, hidrocarbonetos alifáticos e fenóis. O segundo evento ocorreu a partir de 250°C.

Gonçalves et al. (2014) na curva DTA (Figura 12) observou a presença de um evento entre 25 e 110°C com máximo em cerca de 68°C, atribuído a perda de água presente nas fibras e componentes voláteis conforme citado anteriormente, um segundo ocorrendo entre 240 e 300°C e um terceiro entre 300 e 408°C apresentando máximo em torno 367°C com perda de massa de 85%. Segundo os autores esses eventos são atribuídos à etapa de degradação da hemicelulose, celulose e parte da lignina que aparecem como única banda larga.

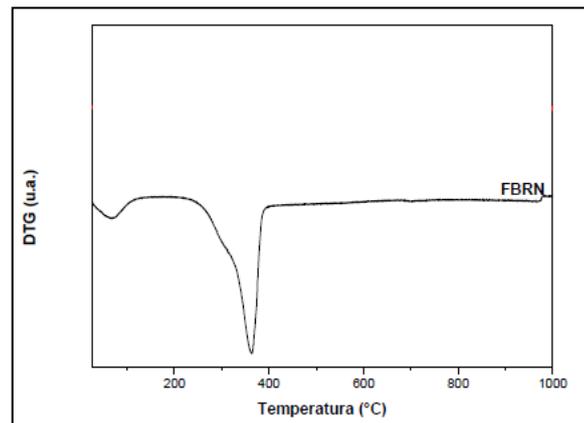
Por meio do difratograma de raio X (Figura 13) os autores verificaram picos atribuídos aos planos cristalinos característicos dos materiais lignocelulósicos, observando que a reflexão (002) foi a mais intensa em todas as partes ao longo da fibra em $2\theta = 22^\circ$ e que a mesma correspondente aos planos de rede dos anéis glicosídicos da celulose. Observaram também pico em $2\theta=15^\circ$ para FBRN, referente ao plano (101) e $2\theta = 34^\circ$ associada ao plano (040), correspondente à parte amorfa presente nas microfibrilas (hemicelulose e lignina). O índice de cristalinidade (I_c) da FBRN foi igual a 65,87.

Figura 11: Curvas TGA da fibra da bananeira roxa



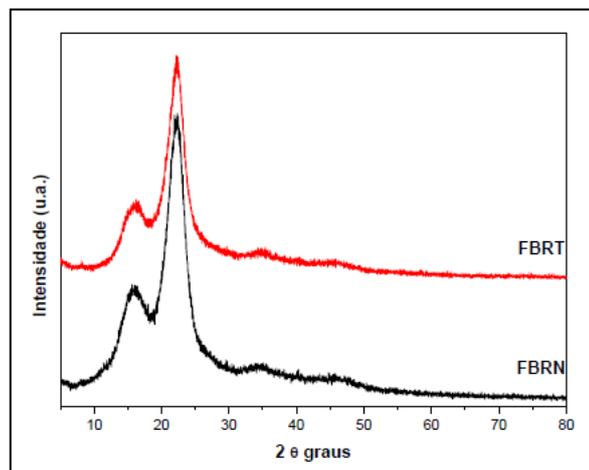
Fonte: Gonçalves et al. (2014)

Figura 12: Curvas DTA da fibra da bananeira roxa



Fonte: Gonçalves et al. (2014)

Figura 13: DRX da fibra da bananeira roxa



Fonte: Gonçalves et al. (2014)

2.8 Considerações finais

As informações apresentadas neste capítulo permitiram discutir a respeito da composição granulométrica e das principais características que fazem com que a *Stone Matrix Asphalt* seja considerada uma mistura de alto desempenho, bem como apresentar o problema associado ao escorrimento e a exudação do ligante nesse tipo de mistura.

Constatou-se que no Brasil ainda não existe uma norma específica para a SMA, mas países como a Alemanha, pioneiro na utilização, e os Estados Unidos dispõem de normas definidas e detalhadas para esse tipo de mistura, apresentando rígidos requisitos para os materiais componentes e exigindo valor de escorrimento máximo de 0,3%. Verificou-se que atualmente, na maioria dos casos, é utilizado asfalto modificado por polímero e fibras de celulose para reduzir o escorrimento excessivo da SMA. No entanto, pesquisas em todo o mundo (Vale, 2007; Kumar et al., 2011; Bindu, 2012; Dikshith, 2012; Oda et al., 2012; Leal, 2013; Vale et al, 2014) são desenvolvidas no intuito de oferecer alternativas de outros tipos de fibras, principalmente naturais e obtidas de rejeitos, para serem usadas como aditivo estabilizador em SMA. Tais pesquisas não só avaliam a capacidade das fibras de controlar o escorrimento, mas também verificam a influência destas nas propriedades mecânicas das misturas, tendo revelado melhorias no desempenho das mesmas com a adição das fibras naturais estudadas.

Por meio de dados sobre a prática da bananicultura no Brasil e no mundo comprovou-se que o agronegócio da banana é consolidado e tem grande importância para a economia de muitos países. No Brasil, país que ocupa a quinta posição dentre os maiores produtores do fruto no mundo, o cultivo é expressivo em todas as regiões, destacando-se a região Nordeste principalmente com o cultivar Pacovan. No entanto, foi visto que apesar da elevada produção e importância para a economia, pouco se debate sobre a destinação dos resíduos associados a bananicultura. Constatou-se que o pseudocaule da planta é o resíduo mais expressivo, em termos de quantidade gerada por hectare, e que o mesmo apresenta grande potencial para a produção de fibras, sendo essas uma possível alternativa para a aplicação em SMA, conforme alguns estudos já realizados devido suas características físicas, absorviva e de resistência frente a altas temperaturas.

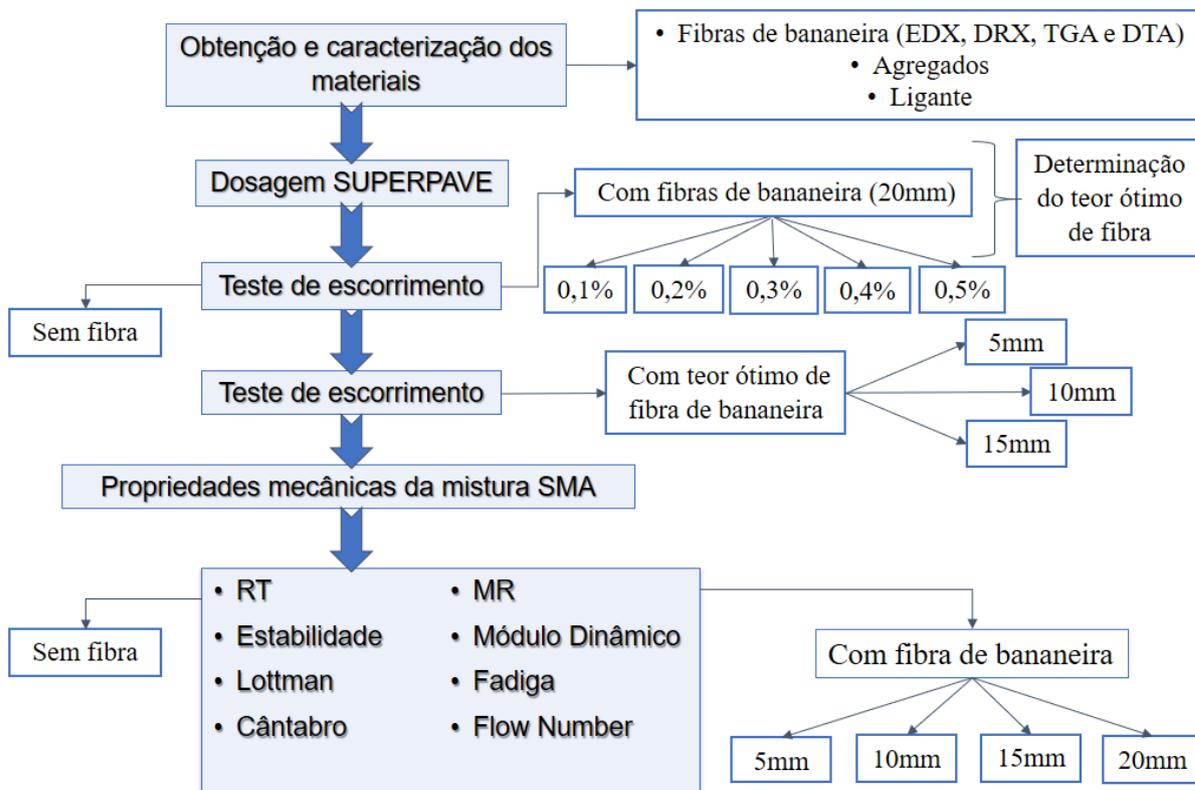
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados e as especificações para a obtenção das propriedades físicas dos agregados, das fibras e do ligantes asfáltico, assim como os procedimentos utilizados para estudar o comportamento mecânico das misturas asfálticas SMA.

A parte experimental da pesquisa foi realizada no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP e no Laboratório de Caracterização de Materiais – LCM, ambos localizados na Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

Os ensaios foram realizados de acordo com normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Departamento de Infraestrutura e Transportes (DNIT), American Society for Testing and Materials (ASTM) e American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). O Fluxograma apresentado na Figura 14 mostra o programa experimental adotado para pesquisa.

Figura 14: Fluxograma do programa experimental da pesquisa



3.1 Materiais

3.1.1 Fibras de bananeira

Dentre as diversas cultivares existentes foi selecionada a Pacovan por ser a variedade de bananeira mais difundida, principalmente no Nordeste. As fibras foram extraídas da capa (parte mais externa) da bainha do pseudocaule por ser a camada mais grossa e mais resistente. A capa é geralmente usada pela indústria de móveis em adornos e estofamento.

Para esse estudo, as fibras de bananeira (Figura 15) foram obtidas numa propriedade privada localizada no sítio Jatobá, zona rural da cidade de Bananeiras – PB.

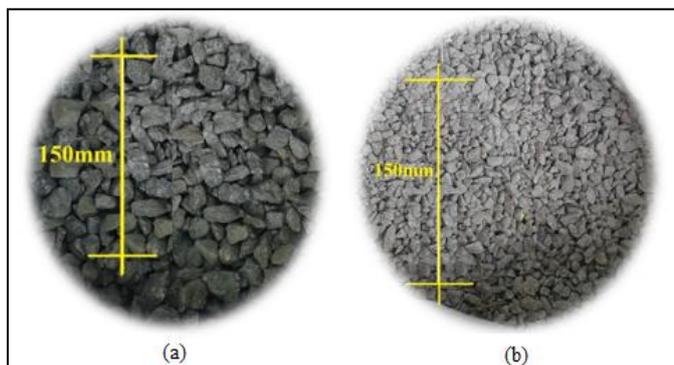
Figura 15: Fibras de bananeira



3.1.2 Agregados graúdos

Os agregados graúdos (Figura 16) utilizados nessa pesquisa foram a brita 19mm e a brita 9,5mm, fornecidas pela Pedreira Rocha Cavalcante - PB e pela Pedreira Serrinha - RN, respectivamente. A amostra foi selecionada por quarteamento (método B) da norma DNIT-PRO 199/96.

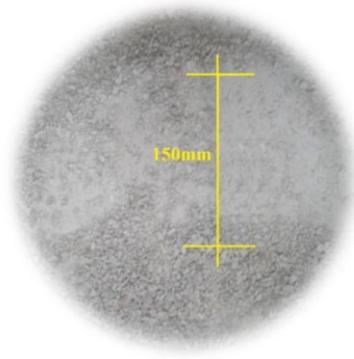
Figura 16: Agregados graúdos: (a) Brita 19mm; (b) Brita 9,5mm



3.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo empregado nessa pesquisa foi o pó de pedra (Figura 17), fornecido pela empresa Serrinha – RN. A amostra foi selecionada de acordo com o método C da norma DNIT-PRO 199/96.

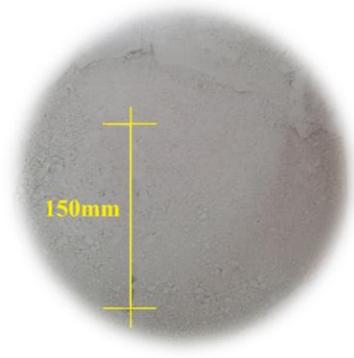
Figura 17: Pó de pedra



3.1.4 Filer

O filer usado foi a cal hidratada da marca MegaO (Figura 18), obtida no comércio de Campina Grande

Figura 18: Cal hidratada



3.1.5 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

Neste estudo foi utilizado o CAP 50-70 (Figura 19) fornecido pela GRECA Asfalto localizada em Maracanaú - CE.

Figura 19: CAP 50/70



3.2 Métodos

3.2.1 Extração da fibra

Os pseudocaulos da bananeira do tipo Pacovan foram cedidos por um agricultor do sítio Jatobá (Figura 20), zona rural do município de Bananeira – PB.

Figura 20: Propriedade privada de onde foram obtidas as bananeiras para a pesquisa



Dentre as árvores da plantação foram escolhidas aquelas as quais os frutos já haviam sido colhidos, sendo estas consideradas resíduos de cultivo pelo agricultor. O corte foi realizado de forma manual, numa altura de aproximadamente 20 cm acima do solo (Figura 21).

Figura 21: Corte do pseudocaule



As bainhas foliares do pseudocaule foram destacadas uma a uma até atingir o palmito (Figura 22). Cada bananeira possuía de 15 a 20 bainhas, sendo que as primeiras (mais externas) por serem as mais expostas às condições ambientais eram mais desgastadas. Portanto, foram descartadas as quatro primeiras bainhas de todos os pseudocaulos utilizados.

Figura 22: Bainhas foliares



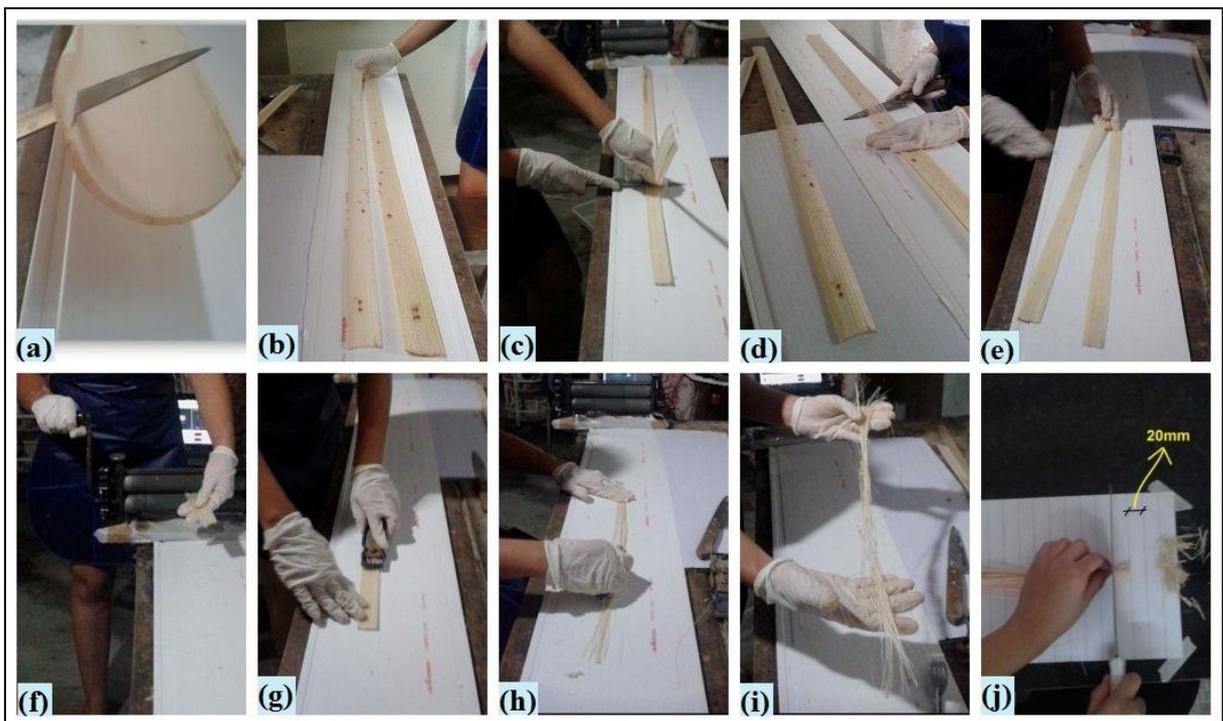
No processo de extração das fibras, que foram utilizadas nessa pesquisa, inicialmente foi descartado a auréola e o contrafilé de cada bainha (Figura 23a). Depois cada bainha foi cortada ao meio, resultando em tiras de aproximadamente 4 cm de espessura (Figura 23b). As

camadas do couro (Figura 23c) e da renda (Figura 23d) das bainhas foliares foram então extraídas e descartadas, restando a camada da capa (Figura 23e). Para a pesquisa, como já mencionado, foram usadas somente as fibras da capa, pelo fato da literatura apontar que este tipo de fibra apresenta uma maior resistência com relação aos outros tipos.

Posteriormente a capa foi passada num cilindro de massas para a eliminação do excesso de líquido (Figura 23f). Em seguida as tiras passaram por um processo de raspagem (Figura 23g) e depois foram penteadas com um garfo de aço para soltar a porção não fibrosa existente entre as fibras (Figura 23h). Em seguida as fibras foram postas ao sol para secar (Figura 23i).

Após a extração as fibras da bananeira foram cortadas manualmente (Figura 23j) nos comprimentos escolhidos para a avaliação das propriedades da mistura (5mm, 10mm, 15mm e 20mm). Cabe salientar que o comprimento inicial utilizado foi o de 20mm para a determinação do teor de fibra, que seria utilizado em toda a pesquisa, por meio do ensaio de escorrimento.

Figura 23: Processo de extração e corte das fibras de bananeira



3.2.2 Caracterização das fibras de bananeira

Nessa seção serão apresentados os métodos utilizados de caracterização da fibra de bananeira utilizada nessa pesquisa.

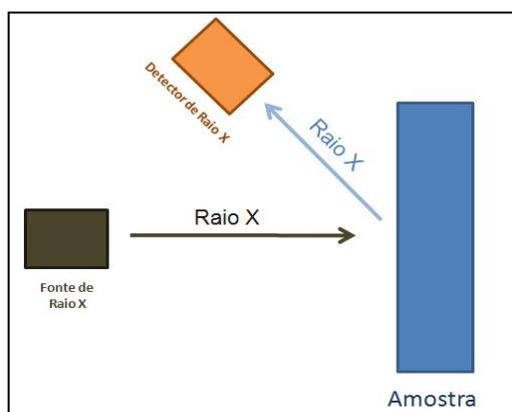
3.2.2.1 Espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX)

A espectrometria de fluorescência de raios X (Figura 24) é uma técnica não destrutiva que permite identificar os elementos presentes em uma amostra (análise qualitativa) assim como estabelecer a proporção (concentração) de cada elemento presente na mesma.

O ensaio é baseado na medida das intensidades (número de raios X detectados por unidade de tempo) dos raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra. Os raios X emitidos por tubos de raios X, ou raios X ou gama por uma fonte radioativa, excitam os elementos constituintes, os quais, por sua vez, emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra (NASCIMENTO FILHO, 1999).

Para a realização da EDX, as fibras de bananeira foram aquecidas por 30 segundos num micro-ondas e depois foram cortadas com tesoura (comprimento \cong 1mm) e amassadas num almofariz. O pó resultante das fibras foi passado na peneira ABNT n° 200 (abertura de 0,074mm). Uma pastilha de 10mm de diâmetro foi confeccionada com uma amostra do pó da fibra passante na peneira n° 200, sendo submetida à emissão de raios X no equipamento EDX 720 da Shimadzu (Figura 25). A geração de raios X foi feita por meio de um tubo com alvo de Rh.

Figura 24: Esquema do ensaio de EDX



Fonte: Kajiyá et al., 2014

Figura 25: Equipamento EDX 720 da Shimadzu



3.2.2.2 Difração de raio X (DRX)

A difração de raios X (DRX) é uma técnica padrão para caracterizar a estrutura cristalina dos materiais. Na maior parte dos sólidos (cristais) os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios X. Ao incidir um feixe de raios X em um cristal, o mesmo interage com os átomos presentes, originando o fenômeno de difração (Figura 26). A difração de raios X ocorre segundo a Lei de Bragg (Equação 1), a qual estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram (característicos para cada fase cristalina):

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad \text{Equação 1}$$

n: número inteiro

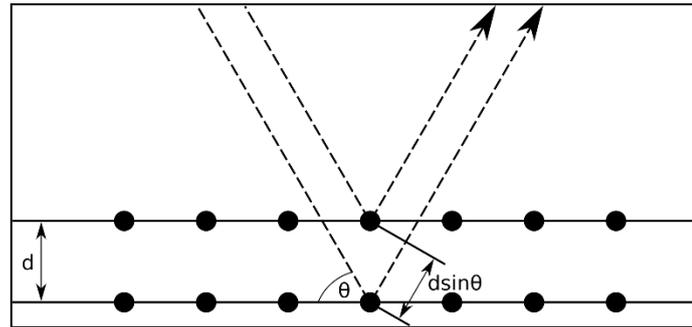
λ : comprimento de onda dos raios X incidentes

d: distância interplanar

θ : ângulo de difração

Para este ensaio, as fibras de bananeira foram processadas do mesmo modo descrito no item 3.2.2.1. Para a determinação dos principais materiais cristalinos componentes, o pó resultante das fibras foi passado na peneira ABNT N° 200 (abertura de 0,074mm) e uma amostra do material passante foi submetido à DRX mediante a utilização de um equipamento Shimadzu XDR-6000 utilizando radiação de $\text{CuK}\alpha$, tensão de 40kV, corrente de 30mA, varredura de $2^\circ < 2\theta < 30^\circ$ e $\lambda = 1,54\text{\AA}$ (Figura 27).

Figura 26: Incidência de um feixe de raios X sobre um cristal.



Fonte: PICCOLI et al. (2006)

Figura 27: Equipamento EDX 720 da Shimadzu



3.2.2.3 Análise térmica

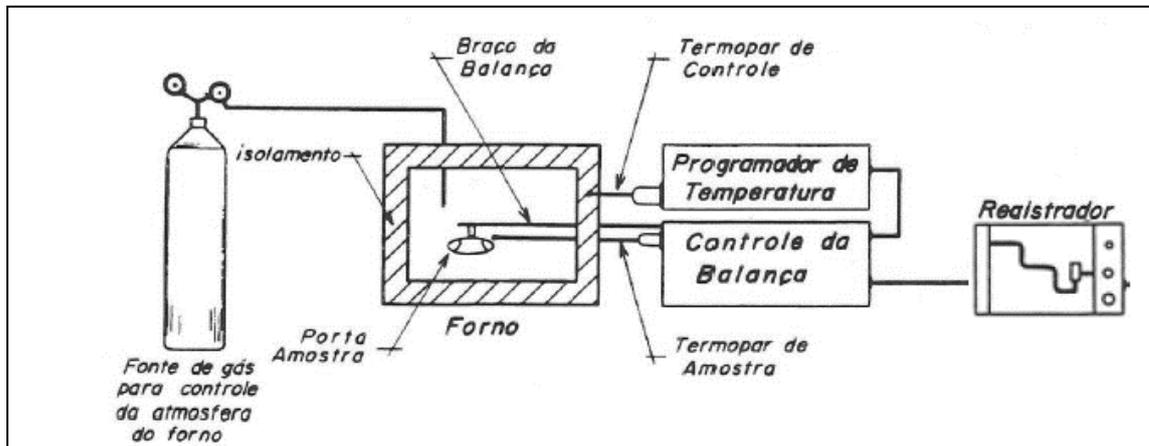
Segundo a International Confederation of Thermal Analysis and Calorimetry (ICTAC) a Análise Térmica (TA) é o estudo das relações entre uma propriedade da amostra e sua temperatura, enquanto a amostra é aquecida ou resfriada de maneira controlada.

As técnicas termoanalíticas usadas para a análise da fibra de bananeira aqui estudada foram a análise termogravimétrica (TG) e a análise térmica diferencial (DTA). Para a realização das análises, as fibras de bananeira foram processadas do mesmo modo descrito no item 3.2.2.1. O pó resultante das fibras foi passado na peneira ABNT N° 200 (abertura de 0,074mm) e uma amostra de 10mg do material passante foi posicionada num cadinho de platina para a realização das análises. A faixa de temperatura utilizada foi de 25°C – 1000°C, a razão de aquecimento de 10°C/min e a atmosfera de ar com vazão de 50ml/min.

A análise termogravimétrica acompanha a variação da massa da amostra, em função da programação de temperatura. O equipamento para a realização da TG (Figura 28) é composto

basicamente pela termobalança que é um instrumento que permite a pesagem contínua de uma amostra em função da temperatura, ou seja, à medida que ela é aquecida ou resfriada.

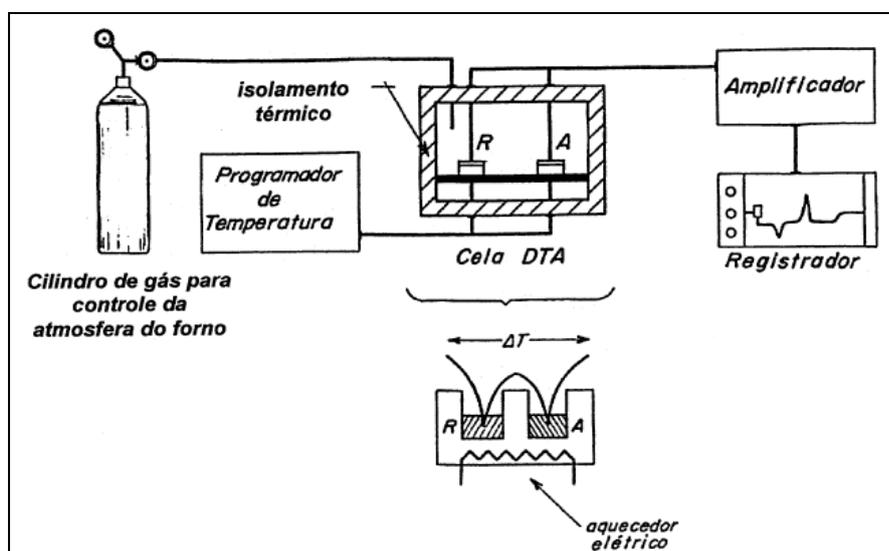
Figura 28: Esquema de um equipamento para análises termogravimétricas



Fonte: Denari e Cavalheiro (2012)

A análise térmica diferencial (DTA) é uma técnica térmica de medição contínua das temperaturas da amostra e de um material de referência termicamente inerte, à medida que ambos vão sendo aquecidos em um forno (Figura 29). Estas medições de temperatura são diferenciais, pois registra-se a diferença entre a temperatura da referência T_r , e a da amostra T_a , ou seja ($T_r - T_a = \Delta T$), em função da temperatura ou do tempo, dado que o aquecimento ou resfriamento são sempre feitos em ritmo linear ($dT/dt = Cte$).

Figura 29: Esquema de um equipamento para análises térmica diferencial (DTA)



Fonte: Adaptado de Bernal et al. (2012)

3.2.3 Propriedades física dos agregados

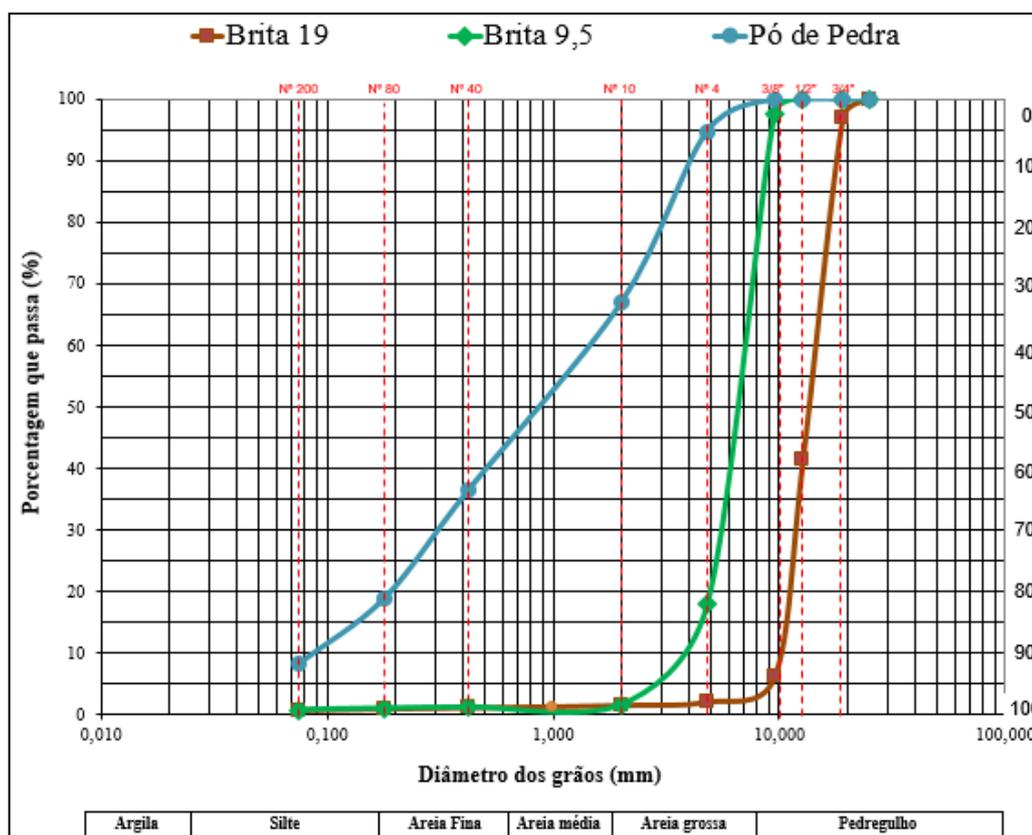
Nessa seção serão apresentados os ensaios utilizados para a caracterização dos agregados, grãos e miúdos, usados nas misturas SMA estudadas, bem como os resultados obtidos.

3.2.3.1 Distribuição granulométrica dos grãos

A distribuição granulométrica dos grãos dos agregados grãos e miúdo foi realizada de acordo com a norma DNIT – ME 083/98, objetivando determinar a porcentagem em peso que cada faixa especificada de tamanhos de partículas representava na massa total ensaiada, possibilitando assim a obtenção da curva de distribuição dos tamanhos das partículas (Figura 30). O método utilizado foi o peneiramento manual, onde a massa total foi dividida em faixas de tamanhos de grãos, exprimindo-se a massa de cada faixa em porcentagem da massa total.

Observa-se que os agregados grãos apresentam graduação uniforme e o pó de pedra graduação densa.

Figura 30: Distribuição granulométrica dos agregados grãos e miúdo



3.2.3.2 Massa específica e absorção

A massa específica e a absorção do agregado graúdo foram obtidas por meio dos métodos de ensaio DNIT – ME 195/97. Para o agregado miúdo, obteve-se o valor da massa específica por meio da norma NBR NM 52/2009 e o valor da absorção por meio da NBR NM 30/01.

No ensaio de massa específica, objetivou-se determinar a massa da unidade de volume do agregado, excluindo-se os vazios entre os grãos e os poros permeáveis, considerando então como se o agregado fosse totalmente comprimido de forma que não houvesse nenhum espaço (tanto internamente quanto externamente). O ensaio de absorção permitiu obter a relação da massa de água absorvida pelo agregado graúdo e miúdo após período de imersão.

Os valores da massa específica real e aparente e da absorção dos agregados graúdos e miúdos utilizados nessa pesquisa estão mostrados na Tabela 21. Percebe-se que os valores de absorção dos agregados graúdos atenderam ao limite máximo estabelecido por norma.

Tabela 21: Massa específica real e aparente e absorção dos agregados graúdos e miúdo

Agregados		Massa específica real (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Absorção(%)	
				Obtida	Máx. permitida
Agregado graúdo	Brita 19mm	2,80	2,75	0,61	2
	Brita 9,5mm	2,49	2,45	0,76	2
Agregado miúdo	Pó de pedra	2,35	2,34	0,16	-

3.2.3.3 Determinação da abrasão “Los Angeles”

O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNIT – ME 035/98 e permitiu verificar o desgaste sofrido pelo agregado graúdo, quando colocado na máquina Los Angeles juntamente à carga abrasiva, submetida às rotações desta máquina à velocidade de 30 rpm à 33 rpm.

As rotações do tambor reproduzem o impacto sofrido pelo agregado durante a usinagem da mistura, através da queda das esferas de ferro fundido sobre os agregados e da queda dos

próprios agregados, uns sobre os outros, e simula o desgaste por meio do atrito dos agregados entre si e com as paredes do tambor.

Terminado o período de rotações, o material foi retirado do tambor e o desgaste foi expresso pela porcentagem, em peso, do material passante após o ensaio na peneira de malhas quadradas de 1,7mm ou peneira nº 12 da ABNT. O valor máximo aceitável para a mistura asfáltica SMA é de 30%.

A brita 19mm e a brita 9,5mm apresentaram abrasão de 26,05% e 41,40%, respectivamente (*Tabela 22*). Percebe-se que o valor da abrasão para a brita 9,5mm ficou acima do preconizado por norma, no entanto o MS-2 Asphalt Mix Design Methods (2014) afirma que agregados com valores de abrasão mais altos do que o estabelecido por norma foram usados com sucesso para a produção de SMA. Outro fato que justifica a utilização desse agregado nessa pesquisa é a pequena porcentagem do mesmo na mistura (9,38%).

Tabela 22: Resultado do ensaio de abrasão Los Angeles

Ensaio	Requisito		Agregados graúdos	
	mín	máx	Brita 19mm	Brita 9,5mm
Abrasão Los Angeles	-	30%	26,05%	41,40%

3.2.3.4 Partículas planas e alongadas

O ensaio para a determinação das porcentagens de partículas planas e alongadas contidas no agregado graúdo, normalizado pela ASTM D 4791/10, permitiu obter a razão dimensional entre o comprimento e a espessura de partículas de uma amostra representativa dos agregados por meio da utilização de um paquímetro (*Figura 31*).

Nessa pesquisa observou-se a especificação aplicada aos agregado graúdos de misturas asfálticas SMA, que exige a avaliação da forma da partícula somente quanto a sua lamelaridade, com razão dimensional de 3:1 e 5:1, sendo respectivamente 20% e 5% os valores máximos admitidos. O resultado desse ensaio para a brita 19mm e para a brita 9,5mm utilizadas estão mostrados na *Tabela 23*, onde percebe-se que ambas atenderam aos requisitos da norma.

Figura 31: Medição das dimensões de uma partícula de agregado graúdo

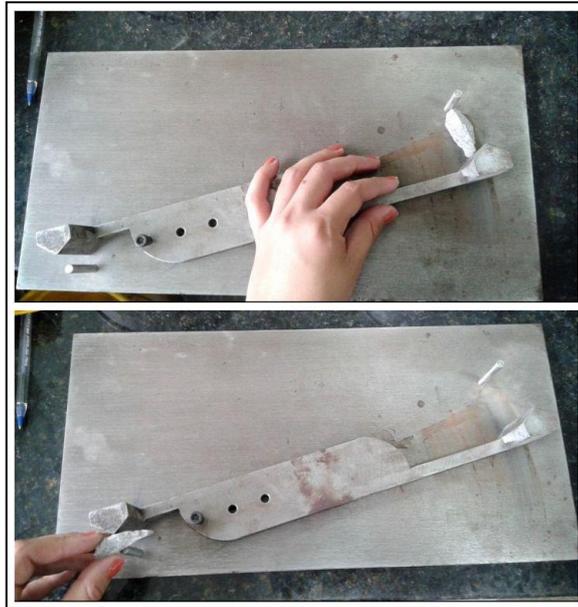


Tabela 23:Resultado do ensaio de partículas planas e alongadas

Ensaio	Critério	Requisito		Agregados graúdos	
		mín	máx	Brita 19mm	Brita 9,5mm
Partículas Planas e Alongadas	3 para 1	*	20%	18,60%	17,35%
	5 para 1	*	5%	0,99%	0,37%

3.2.3.5 Partículas fraturadas

O ensaio de determinação da porcentagem de partículas fraturadas contidas numa amostra de massa pré-definida de agregados graúdos foi realizado conforme a ASTM D 5821/13, este consistiu em espalhar as partículas de agregados em uma superfície plana, limpa e grande o suficiente para proporcionar um exame visual cuidadoso de cada partícula individualmente. Cada partícula foi classificada de acordo com o seu número de faces fraturadas, considerando como face fraturada do agregado a face que contém forma e borda bem definidas e que expõem o interior da partícula por meio de uma área não inferior a $\frac{1}{4}$ da área máxima da partícula. A face fraturada apresenta-se como uma parte quebrada, rugosa e/ou angular, criada por meio do processo de britagem ou pela ação da natureza (Figura 32).

A determinação da porcentagem de partículas fraturadas foi realizada por meio da contagem das partículas com uma e duas faces fraturadas, em relação ao número total de partículas da amostra. A Tabela 24 mostra que ambos os agregados graúdos utilizados nessa pesquisa obedeceram ao requisito da norma.

Figura 32: Partículas fraturadas da brita 19mm



Tabela 24: Resultado do ensaio da determinação das porcentagens de partículas fraturadas

Ensaio	Critério	Requisito		Agregados Graúdos	
		Mín	máx	Brita 19mm	Brita 9,5mm
Partículas Fraturadas	Duas faces	90%	*	100%	100%

3.2.3.6 Adesividade

A propriedade de aderência entre o agregado graúdo e o asfalto é avaliada visualmente por meio do ensaio de adesividade, normalizado pela DNIT ME 078/94, quanto ao deslocamento da película de asfalto que envolve a partícula do agregado, quando a mistura é submetida à ação da água, numa temperatura de 40°C por 72 horas.

O resultado do ensaio de adesividade para a brita 19mm utilizada nessa pesquisa foi satisfatório, ou seja, não houve descolamento da película de asfalto das duas amostras do agregado após o condicionamento (Figura 33).

Figura 33: Etapa da avaliação visual



3.2.3.7 Equivalente de areia

O ensaio foi executado conforme a norma DNIT ME 054/97, sendo uma relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de agregado miúdo, numa proveta, em condições estabelecidas (Figura 34). O método consiste em agitar energicamente a amostra de agregado miúdo, composta do material passante na peneira de abertura 4,75mm (nº4), numa proveta graduada contendo solução defloculante, de modo a soltar as partículas de argilominerais ou da fração argilosa, aderidas ao agregado.

O valor mínimo para o equivalente de areia dos agregados miúdos usados em misturas SMA é de 55%. O pó de pedra atendeu o requisito mínimo, conforme mostrado na Tabela 25.

Figura 34: Ensaio de Equivalente de Areia



Tabela 25: Resultado do ensaio de equivalente de areia

Ensaio	Requisitos		Agregado miúdo
	mín	máx	Pó de pedra
Equivalente areia	55%	*	81,93%

3.2.3.8 Angularidade

O ensaio de angularidade do agregado miúdo, normalizado pela ASTM C 1252/17, determina a porcentagem dos vazios não compactados contidos entre as partículas de agregados, quando estas são vertidas de uma altura de queda estabelecida, dentro de um cilindro de volume conhecido (100cm³), conforme ilustra a Figura 35.

Quanto maior a angularidade e rugosidade das partículas, maior o valor da angularidade esperado, pois quando estas caem livremente umas sobre as outras, sem sofrer acomodação por compactação, suas arestas e cantos agudos fazem com que fiquem mais distantes umas das outras, aumentando o volume de vazios entre partículas. As partículas menos angulares (com cantos arredondados) e com textura superficial lisa, ao caírem livremente umas sobre as outras, acomodam-se com mais facilidade, diminuindo assim o volume de vazios existentes entre partículas, proporcionando menores valores de angularidade.

O valor da angularidade do agregado miúdo usado nessa pesquisa correspondeu à média de três determinações obtidas pelo método B. O resultado apresentado na Tabela 26 foi satisfatório, atendendo os requisitos para tráfego médio e alto.

Figura 35: Ensaio de Angularidade do agregado miúdo



Tabela 26: Resultado do ensaio de angularidade do agregado miúdo

Ensaio	Critério	Requisito	Agregado Miúdo
			Pó de pedra
Angularidade	Método B	Volume de tráfego médio $\rightarrow \geq 40\%$	46,41%
		Volume de tráfego alto $\rightarrow \geq 45\%$	

3.2.4 Caracterização do cimento asfáltico de petróleo

Nessa seção serão apresentados os ensaios utilizados na caracterização do cimento asfáltico de petróleo usado como ligante nas misturas SMA estudadas, bem como os resultados obtidos.

3.2.4.1 Ensaios de caracterização do cimento asfáltico de petróleo

O ligante utilizado nessa pesquisa foi caracterizado por meio dos seguintes ensaios de caracterização: penetração, ponto de amolecimento, ponto de fulgor, ductilidade, viscosidade rotacional e Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT).

O ensaio de penetração foi realizado de acordo com a norma DNIT ME-155/10 e consistiu na medida, em décimo de milímetro, de uma agulha de massa padronizada de 100g que penetrou uma amostra de cimento asfáltico com volume padronizado, à temperatura de 25°C durante 5 segundos.

O ensaio de ponto de amolecimento, também conhecido como ensaio do anel e bola, seguiu os procedimentos da norma DNIT ME 131/10. Este ensaio é usado para determinar empiricamente a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido sob certas condições particulares e atinge uma determinada condição de escoamento.

O ponto de fulgor foi realizado conforme procedimentos da norma DNER ME 148/94. Representa a menor temperatura na qual os vapores emanados durante o aquecimento do material asfáltico produzem lampejos inflamados por contato com uma chama padronizada.

O ensaio de ductilidade seguiu os procedimentos da norma DNER-ME 163/98, permitindo medir a resistência, em centímetros, em que um corpo de prova de CAP, em

condições padronizadas, se rompeu quando submetido a uma tração em condições especificadas.

Por meio do viscosímetro rotacional da marca Brookfield, de norma NBR 15184/05 mediu-se a viscosidade do cimento asfáltico através de um spindle (ponta de prova) em rotação constante, imersa em uma amostra do ligante, onde foi verificado o torque necessário para rotacionar o spindle sobre a amostra, a uma velocidade específica, nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C.

O RTFOT foi realizado conforme a ASTM D 2872/12 e consistiu em levar uma amostra de ligante para a estufa RTFO de prateleiras giratórias com circulação de ar a uma temperatura de 163 +/- 1°C. Em seguida, realizou-se novamente os ensaios de penetração, viscosidade e ductilidade com o ligante que saiu da estufa, permitindo avaliar o efeito do envelhecimento a curto prazo.

Os resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico estão organizados na Tabela 27. De acordo com as características exigíveis, fixadas pela norma DNIT 095/06 – EM, para a classificação dos cimentos asfálticos de petróleo empregados em pavimentação, observou-se que o ligante utilizado atendeu a todos os requisitos, antes e após RTFOT, para ser classificado como CAP 50-70.

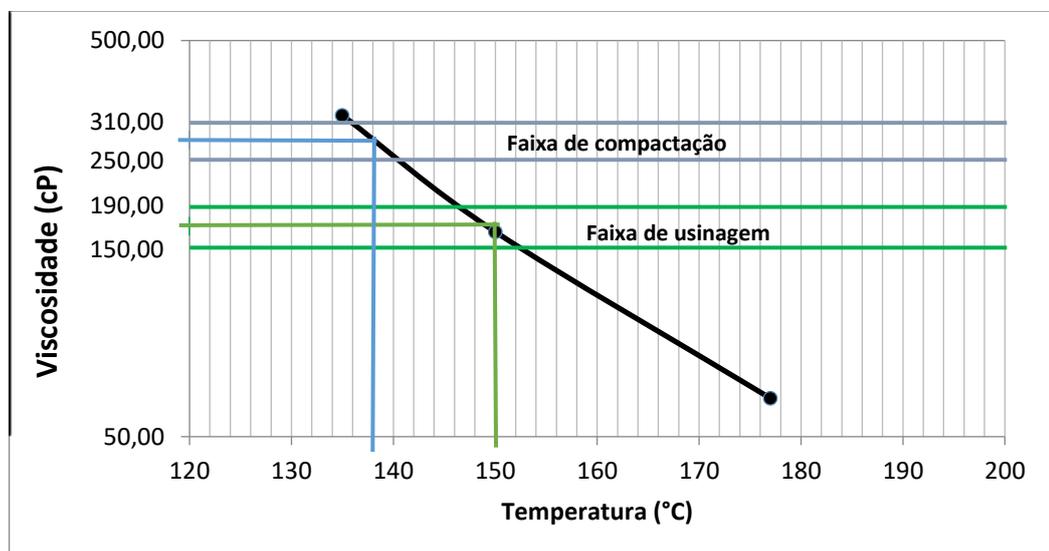
Por meio do resultado do ensaio de viscosidade traçou-se a curva viscosidade x temperatura do ligante (Figura 36) que possibilitou a determinação da temperatura de compactação e de usinagem da mistura. A temperatura do ligante na hora de ser misturado ao agregado deve ser tal que a sua viscosidade esteja situada entre 170±20 cP. Logo, nessa faixa de usinagem, escolheu-se 150°C como a temperatura de usinagem.

A temperatura dos agregados foi de 15°C acima da temperatura definida para o ligante e a temperatura de compactação foi definida dentro da faixa que o ligante apresentou viscosidades entre 280±30cP, escolhendo-se assim 138°C.

Tabela 27: Resumo da caracterização do ligante

CARACTERÍSTICAS	Unid.	LIMITES	CAP
		CAP 50 - 70	
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	dmm	50 - 70	69
Ponto de amolecimento, mín	°C	46	48,5
Ponto de fulgor, mín	°C	235	>300
Ductilidade a 25° C, mín	Cm	60	>100
Viscosidade Rotacional	cP		
- a 135°C, SP 21 mín. 20 rpm		274	323,75
- a 150°C, SP 21 mín.		112	164,50
- a 177°C, SP 21 mín		57 – 285	62,50
Pós RTFO			
Penetração retida, mín	dmm	55	55
Aumento do Ponto de amolecimento, máx	°C	8	5,25
Ductilidade a 25° C, mín	cm	50	82,5
Viscosidade Rotacional pós RTFOT	cP		
- a 135°C, SP 21 mín. 20 rpm		-	507,50
- a 150°C, SP 21 mín.		-	245,00
- a 177°C, SP 21 mín		-	83,00

Figura 36: Viscosidade x Temperatura



3.2.5 Dosagem SUPERPAVE

Objetivando determinar o teor ótimo de ligante asfáltico para a mistura SMA estudada, realizou-se a dosagem SUPERPAVE.

O primeiro passo do procedimento consistiu na escolha de três composições granulométricas. Optou-se pela utilização da faixa 19mm da AASHTO MP 8-02 (Tabela 28) por ser uma faixa pouco estudada.

Logo, para o enquadramento das misturas na faixa granulométrica escolhida, foi necessária a utilização da brita 19mm, da brita 9,5mm, do pó de pedra e da cal. Nesta etapa as fibras ainda não estavam sendo usadas na composição da mistura.

De posse da granulometria de cada um dos materiais construiu-se, com o auxílio de uma planilha Excel, as três composições granulométricas a serem testadas: uma composição superior (próxima ao limite superior da faixa) (Figura 37), uma composição intermediária (na região mediana da faixa) (Figura 38) e uma composição inferior (próxima ao limite inferior da faixa) (Figura 39).

Tabela 28: Faixa 19mm da AASHTO MP 8-02/01

Abertura das peneiras, mm	mín	máx
25	-	100
19	90	100
12,5	50	88
9,5	25	60
4,75	20	28
2,36	16	24
1,18	-	-
0,6	-	-
0,3	-	-
0,075	8	11

Figura 37: Curva de Fuller – Composição granulométrica superior

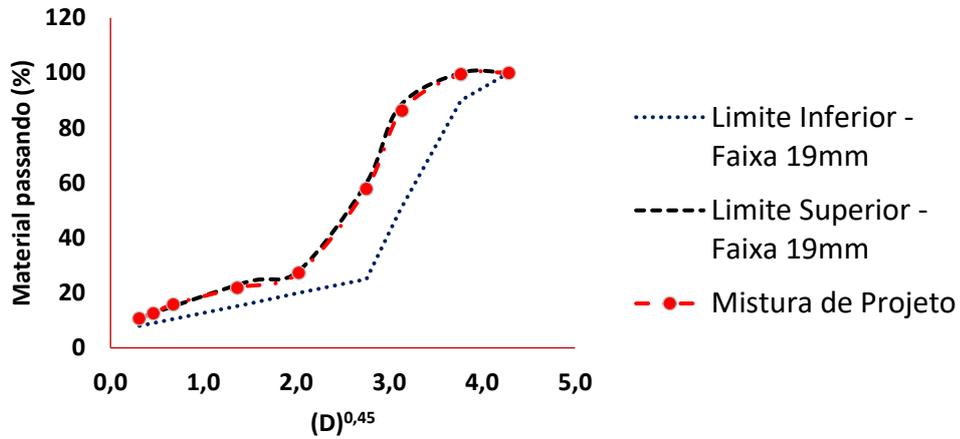


Figura 38: Curva de Fuller – Composição granulométrica intermediária

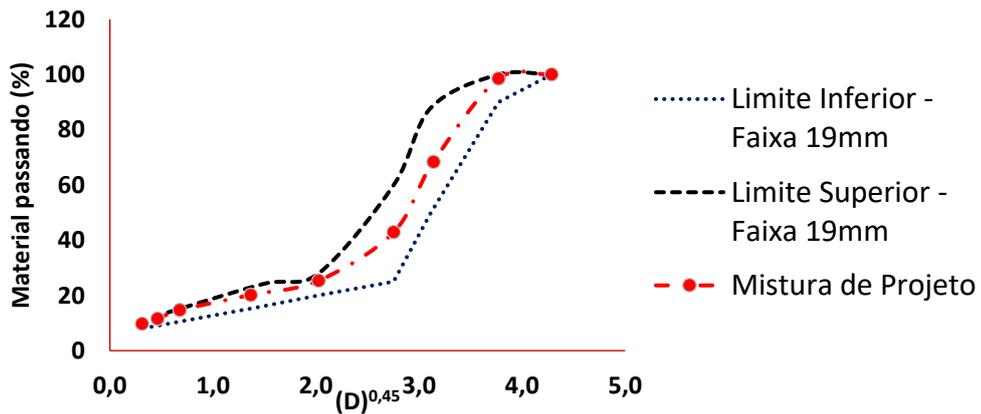
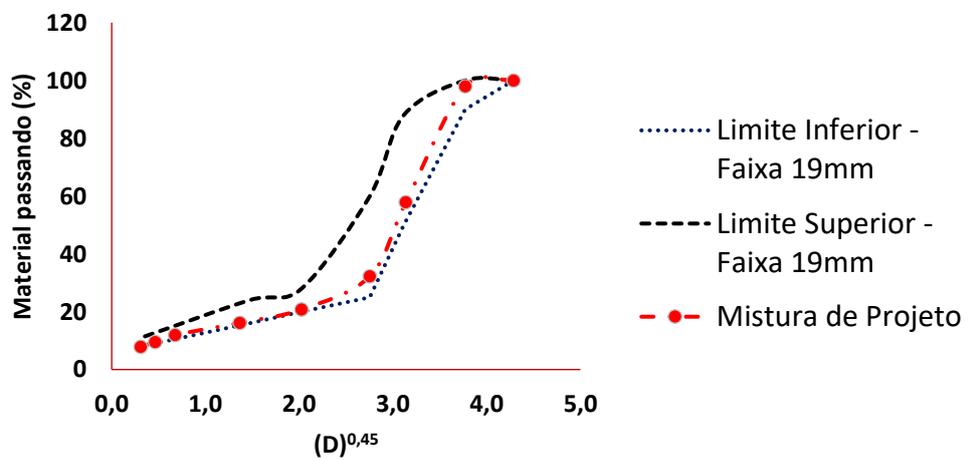


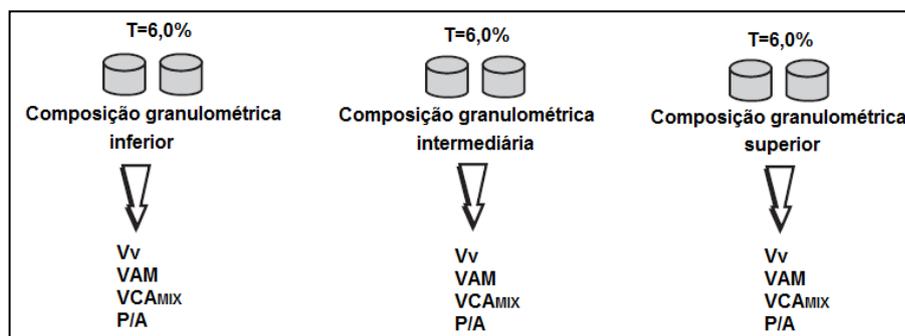
Figura 39: Curva Fuller – Composição granulométrica inferior



O passo seguinte foi a compactação de corpos de prova com um mesmo teor de ligante de tentativa para cada mistura (dois corpos de prova por mistura), sendo esse teor inicial adotado de 6,0% que é o menor teor admitido para SMA, segundo a AASHTO MP 8-02/01. No momento da mistura, observou-se que esse teor de ligante inicial para as composições granulométricas intermediária e superior era insuficiente, não sendo possível obter a homogeneização necessária do material.

Conforme mostrado na Figura 40, das três misturas experimentais obtiveram-se as propriedades volumétricas (volume de vazios (V_v), vazios no agregado mineral (VAM) e vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada (VCA_{MIX})) após a compactação dos corpos-de-prova no compactador giratório, com o número de giros de projeto ($N_{projeto}$) igual a 50. Além dos requisitos volumétricos mencionados, verificou-se também a proporção pó/asfalto (P/A), que corresponde à razão entre o teor de material passante na peneira N° 200 e o teor de ligante, parâmetro que deve estar entre 0,6 e 1,2.

Figura 40: Representação esquemática dos grupos de corpos de prova das três composições granulométricas

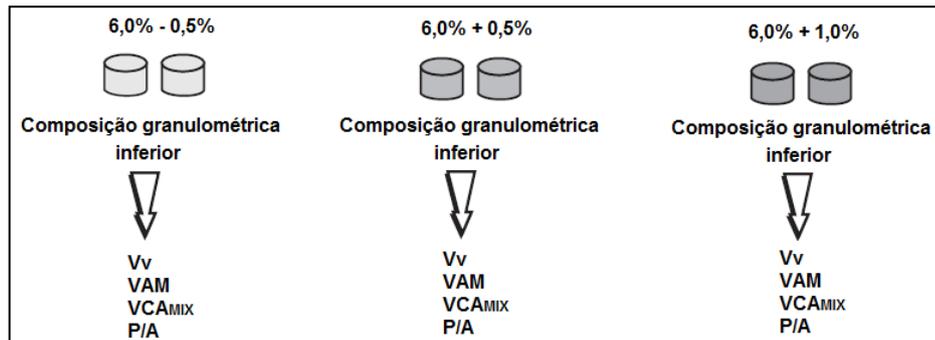


De acordo com a AASHTO MP 8-02/01, a premissa principal do projeto de misturas SMA pela metodologia SUPERPAVE é que a quantidade de ligante usada deva ser tal que a mistura atinja 4% de vazios, $VAM \geq 17\%$ e que necessariamente apresente um esqueleto pétreo onde seja garantido o contato entre os grãos de agregados graúdos, que acontece quando o VCA_{MIX} é menor ou igual ao VCA_{DRC} (vazios da fração graúda do agregado compactado) no número de giros de projeto.

Nenhuma das misturas experimentais testadas atendeu a todos os parâmetros mencionados. Portanto, foi realizada uma nova tentativa, com a mistura que obteve os parâmetros mais próximos dos valores especificados (composição granulométrica inferior), para estimar outro teor de ligante. Testou-se então corpos de prova confeccionados

considerando outros três teores: $\pm 0,5\%$ e $+1\%$, conforme mostrado na Figura 41. Os corpos de prova foram novamente compactados no $N_{projeto}$ e as propriedades volumétricas correspondentes obtidas.

Figura 41: Representação esquemática dos grupos de corpos de prova da composição granulométrica inferior, variando o teor de ligante.



Verificou-se o atendimento da condição $VCAMIX \leq VCADRC$ para cada uma das misturas e, posteriormente, a partir dos parâmetros volumétricos de cada uma delas traçou-se os gráficos $Vv \times$ Teor de ligante (Figura 42) e $VAM \times$ Teor de ligante (Figura 43). Na Figura 42 identificou-se o teor de ligante em que o valor do volume de vazios da mistura de projeto fosse 4% e na Figura 43 identificou-se o teor de ligante em que a mistura de projeto obtivesse um $VAM \geq 17\%$, sendo respectivamente 6,1% e 6,4%.

Optou-se por adotar um teor de ligante que estivesse entre 6,1% e 6,4% e realizar uma nova tentativa para verificar se os parâmetros volumétricos, preconizados por norma para a SMA, seriam enfim atendidos. Portanto, uma mistura foi confeccionada com o teor de 6,2%, onde foram obtidos os parâmetros mostrados na Tabela 29. Sendo assim, como houve correspondência dos parâmetros da mistura com os parâmetros estabelecidos pela norma, o teor ótimo de ligante asfáltico adotado para toda a pesquisa foi de 6,2%. A Tabela 30 mostra o traço da mistura de projeto obtido por meio dessa dosagem.

Figura 42: Vv x Teor de ligante

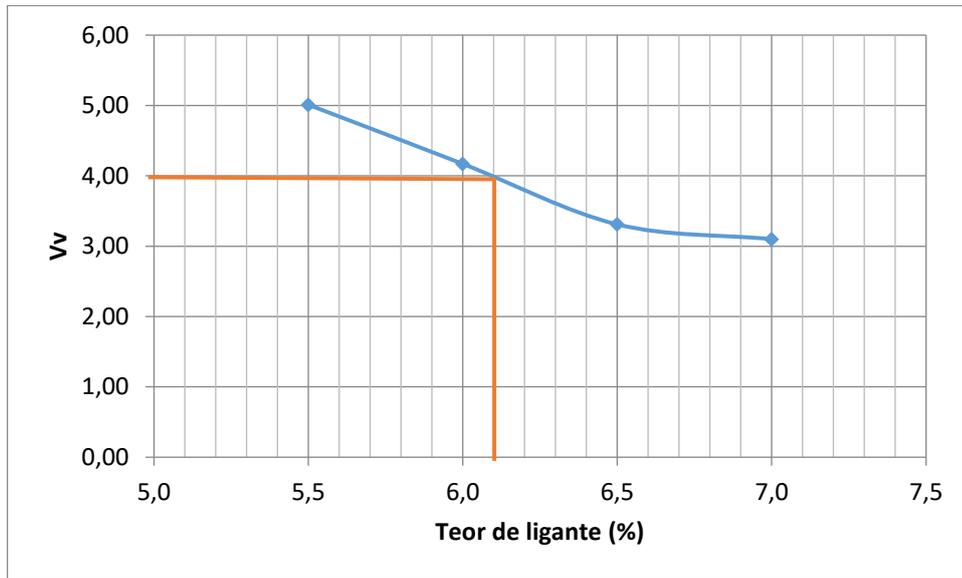


Figura 43: Vv x VAM

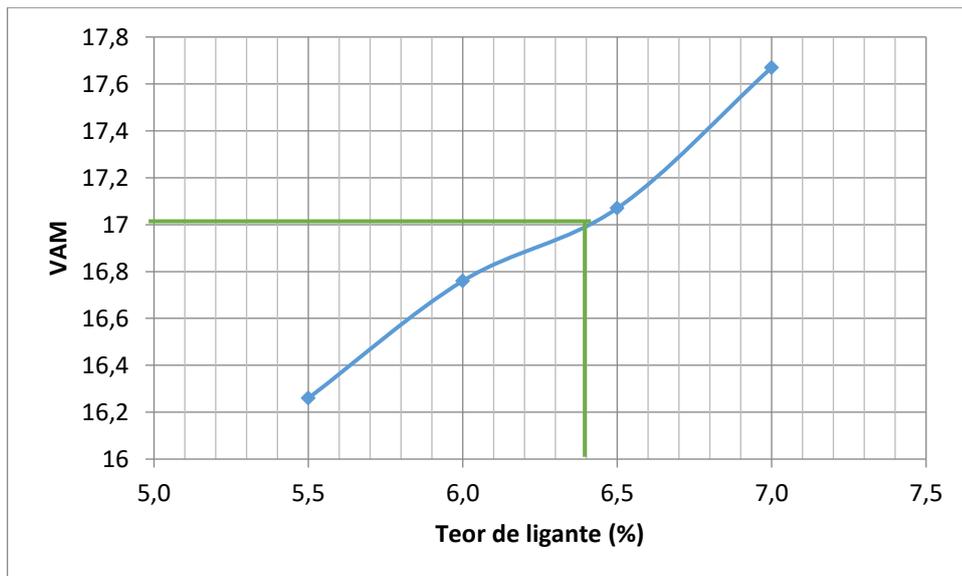


Tabela 29: Parâmetros da mistura SMA com 6,2% de CAP

Vv (%)	VAM (%)	$VCA_{MIX} \leq VCA_{DRC}$	P/A
3,94	17	$33,47 \leq 45,08$	1,0

Tabela 30: Traço da mistura de projeto

Componentes	Brita 19	Brita 9,5	Pó de pedra	Cal	CAP
%	67,4%	9,4%	11,3%	5,8%	6,2%

3.2.5.1 Obtenção dos parâmetros volumétricos das misturas SMAs avaliadas

O volume de vazios da mistura compactada foi calculado utilizando a Equação 2.

$$Vv (\%) = 100x \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

G_{mb} = massa específica aparente medida (g/cm³)

G_{mm} = massa específica máxima medida (g/cm³)

A massa específica aparente medida foi obtida por meio dos procedimentos da AASHTO T 166/16 e calculada conforme Equação 3:

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_{ss} - M_{sub}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

M_s = Massa seca do corpo de prova (g);

M_{sub} = Massa submersa do corpo de prova (g);

M_{ss} = Massa do corpo de prova com a superfície seca (g);

A densidade máxima medida foi obtida pelo método Rice preconizado pela norma americana ASTM D2041/11. A sequência do teste está mostrada na Figura 44 e o cálculo da G_{mm} foi realizado de acordo com a Equação 4:

$$G_{mm} (g/cm^3) = \frac{A}{A - (C - B)} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

A = Massa da amostra da mistura seca (g);

B = Massa do recipiente com água (g);

C = Massa do recipiente + amostra submersa em água (g);

Figura 44: Sequência do Rice teste



O VAM foi obtido por meio da seguinte Equação 5:

$$VAM (\%) = 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{sb-g}} \times P_{ag} \right) \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

G_{sb-g} = Massa específica aparente combinada dos agregados graúdos (g/cm^3);

P_{ag} = Porcentagem de agregados graúdos na mistura total (em peso) (%);

O contato entre os grãos dos agregados graúdos na mistura SMA é garantido quando o VCA_{MIX} (vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada) é menor ou igual ao VCA_{DRC} (vazios da fração graúda do agregado compactado), ou seja, quando os agregados graúdos, em sua grande maioria com dimensões similares, tocam-se, formando vazios que devem ser ocupados, em parte, por um mástique, composto por agregados na fração areia, fíler, asfalto e fibras. Deve-se sempre manter vazios com ar para que a mistura não exsude e possa ainda sofrer compactação adicional pelo tráfego. O VCA_{DRC} e o VCA_{MIX} (esquematisados na Figura 45) foram calculados por meio da Equação 6 e Equação 7, respectivamente:

$$VCA_{DRC} = \left(\frac{G_{sb-g} G_w - G_s}{G_{sb-g} G_w} \right) X100 \quad \text{Equação 6}$$

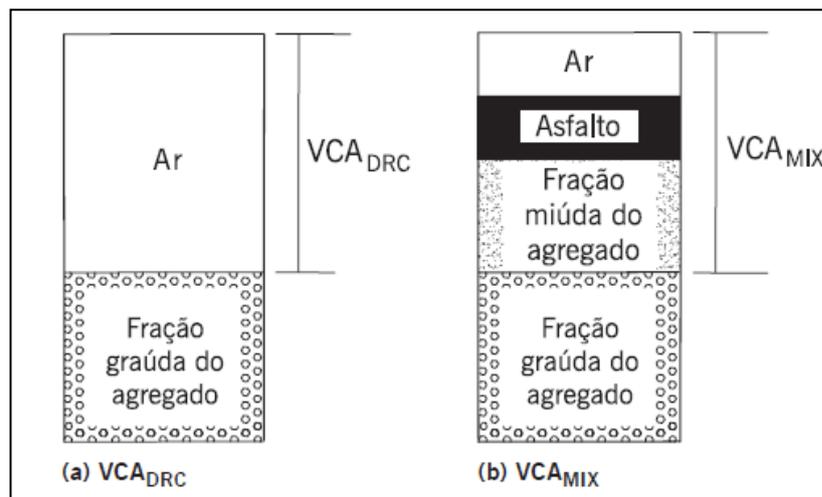
$$VCA_{MIX} = 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{sb-g}} \times P_{ag} \right) X100 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

G_s = massa específica da fração graúda do agregado seco compactado, kg/dm^3 (DNER-ME 153/97);

G_w = massa específica da água (998kg/m^3);

Figura 45: Representação esquemática dos parâmetros volumétricos VCA_{MIX} e VCA_{DRC} de controle do SMA



Fonte: Bernucci et al. (2008)

3.2.5.2 Detalhes das etapas de mistura e compactação das SMAs avaliadas

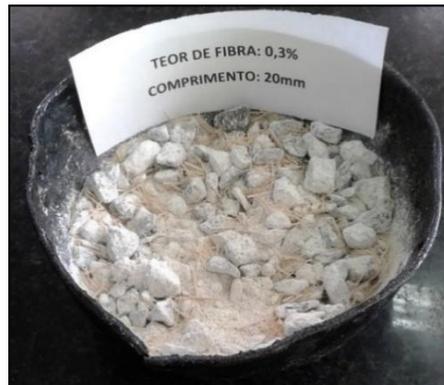
As etapas de mistura e compactação das SMAs analisadas nessa pesquisa apresentaram algumas peculiaridades que serão mostradas nesse tópico.

- adição da fibra na mistura

Existem dois métodos citados na literatura para a introdução de fibras na mistura asfáltica: os processos por via seca e por via úmida. No processo por via úmida as fibras são misturadas ao ligante asfáltico antes da incorporação deste aos agregados. No processo seco as fibras são misturadas aos agregados antes da adição do ligante.

Nesta pesquisa foi utilizado o processo por via seca, com as fibras substituindo parte dos agregados na mistura (Figura 46). Levou-se os agregados juntamente com as fibras para o aquecimento em estufa a 165°C antes da mistura com o ligante, não havendo risco de deterioração das fibras, pois, como será visto mais adiante, constatou-se que a temperatura do início da degradação das mesmas é superior a temperatura supracitada.

Figura 46: Adição da fibra por via seca



- homogeneização dos componentes

A mistura dos componentes das SMAs foi realizada por processo manual. Após duas horas em estufa para aquecimento dos materiais (agregados e fibras a 165°C e ligante a 150°C), adicionava-se o ligante aos agregados (ou agregados + fibras) (Figura 47a) e posteriormente um operador executava a mistura dos materiais com uma colher (Figura 47b).

Na maioria dos casos não era possível efetivar a homogeneização num primeiro momento devido ao arrefecimento da mistura. Como o material ficava muito solto, após as duas horas de envelhecimento da mistura em estufa procedia-se uma nova tentativa de homogeneização (Figura 47c) o que melhorava o aspecto final da mesma.

Figura 47: Procedimentos da etapa de mistura das SMAs avaliadas



Constatou-se que o processo manual utilizado em laboratório não é adequado, principalmente para esse tipo de mistura, pois a quantidade de agregado graúdo é muito elevada dificultando a operação da homogeneização manual (Figura 48), associando-se ao fato da inserção da fibra que piora a trabalhabilidade da mistura. Tais fatores deixavam os corpos de prova desuniformes acentuando a anisotropia, o que pode ter influenciado nos resultados mecânicos (Figura 49).

Figura 48: Homogeneização manual deficiente



Figura 49: Corpos de prova da SMA (altura e diâmetro)



- acomodação da mistura no cilindro

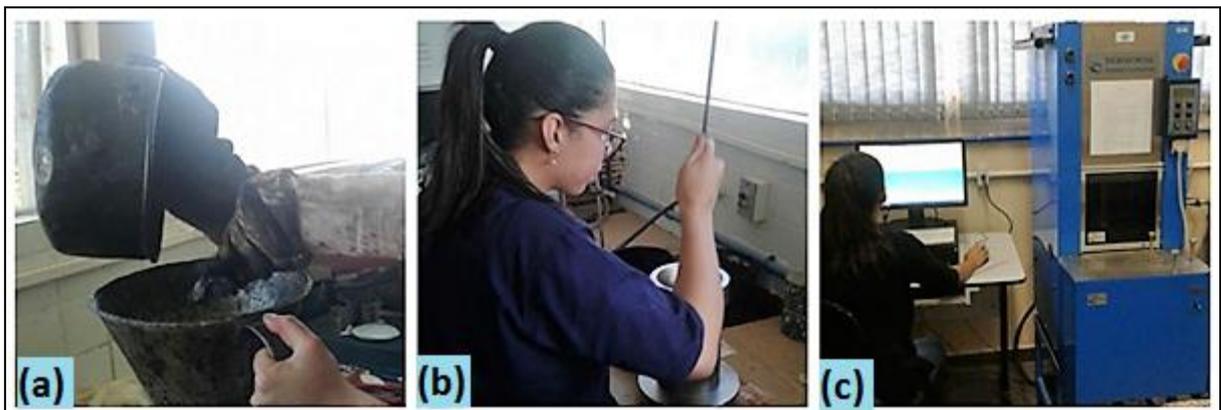
Observou-se que o modo de colocação da mistura no cilindro antes de levar ao compactador SUPERPAVE também contribuía para a heterogeneidade dos corpos de prova, pois verificou-se que o método de despejar toda a massa da mistura de uma só vez fazia com que a fração mais grosseira se depositasse no fundo do cilindro e o mástique permanecesse na parte superior, ficando visível a separação dessas duas composições nos corpos de prova compactados.

Sendo assim, optou-se por despejar a massa da mistura no cilindro em duas parcelas (Figura 50a), intercalando com uma acomodação do material por meio de golpes com uma haste (Figura 50b). Tal procedimento auxiliou na obtenção de corpos de prova menos desuniformes.

- número de giros de projeto

Inicialmente, a compactação dos corpos de prova (Figura 50c) foi realizada com 100 giros, mas observou-se desagregações do esqueleto pétreo e dificuldades para se atingir o volume de vazios especificado de 4,0%. Baseando-se em estudos já realizados (CUNHA, 2004; GARDETE et al., 2009; EL-HAGE, 2012) que recomendam a redução do número de giros para misturas SMA com a finalidade de manter a estrutura e a integridade do esqueleto pétreo e de atender as características volumétricas da mistura, adotou-se nesta pesquisa um número de giros igual a 50 conforme usado no estado da Geórgia (EUA), um dos pioneiros em misturas do tipo SMA.

Figura 50: Procedimentos usados na confecção das SMAs avaliadas



3.2.6 Propriedades das misturas asfálticas SMA

Após a determinação do teor ótimo de CAP, realizou-se o ensaio de escorrimento na mistura SMA sem aditivo estabilizador, com o intuito de justificar o emprego da fibra. Em paralelo foram confeccionados corpos de prova a fim de determinar as propriedades mecânicas da SMA estudada com a ausência do aditivo estabilizador, o que serviria de parâmetro comparativo para as outras misturas SMA utilizando a fibra.

Em seguida, foram realizados ensaios de escorrimento com a SMA usando fibra de bananeira como aditivo estabilizador nos teores de 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4% e 0,5%, a fim de determinar qual desses teores seria o ideal para reduzir o escorrimento do ligante a valores abaixo do 0,3% preconizado pela norma AASHTO MP 8-02/01. O teor encontrado foi utilizado durante toda a pesquisa.

A justificativa da adoção desse intervalo de teores de fibra para o teste foi baseada em publicações anteriores (WOODSIDE et al., 1998; VALE, 2007; KUMAR et al., 2011; ODA et al., 2012; BINDU, 2012; LEAL, 2013; VALE et al., 2014) que sugerem um nível de até 0,5% de fibras naturais na composição de uma SMA, sendo 0,3% o teor ótimo mais frequentemente encontrado.

Cabe esclarecer que nessa etapa utilizou-se fibras de bananeira cortadas em comprimento de 20mm (tamanho máximo usado nessa pesquisa), seguindo recomendações de Vale (2007) que usou fibra de coco e identificou que a mesma deve ter um comprimento máximo de 20mm para ser aplicada em SMA, pois a utilização do tamanho de 30mm fez com que houvesse a formação de gomos na mistura, dificultando assim sua trabalhabilidade. Portanto, nessa pesquisa decidiu-se trabalhar com a fibra de bananeira com comprimento de até 20mm, sendo escolhidos os valores de 5mm, 10mm, 15mm e 20mm para serem avaliados na mistura SMA em estudo.

Determinado o teor ótimo de fibra, posteriormente foi realizada uma nova análise do escorrimento para verificar a influência dos outros comprimentos da fibra (5mm; 10mm e 15mm) nesse parâmetro. Por fim, avaliou-se o comportamento mecânico de cada uma das misturas SMA utilizando cada um dos comprimentos de fibra de bananeira anteriormente especificados, inseridos na mistura de acordo com o teor ótimo encontrado na etapa inicial.

A caracterização mecânica consistiu na realização dos ensaios de Estabilidade Marshall, Dano por umidade induzida (Lottman Modificado), Resistência à tração por compressão

diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR), Módulo Dinâmico ($|E^*|$), Flow number (FN), Fadiga à tensão controlada por compressão diametral e Cântabro.

3.2.7 Sensibilidade ao escorrimento

O ensaio de sensibilidade ao escorrimento foi executado de acordo com o método da AASHTO T 305/97.

Segundo esta norma o escorrimento ou gotejamento da mistura é aquela porção de material que se separa da amostra como um todo e é depositada fora do cesto de arame durante o ensaio, podendo ser este material drenado o ligante ou uma combinação de ligante, aditivos e/ou agregado miúdo. Tal norma estabelece que a porcentagem máxima de escorrimento em relação ao peso total da amostra não deve ultrapassar 0,3%.

Na etapa da mistura sem fibra aqueceu-se os agregados na temperatura de 15 °C acima da temperatura de mistura, ou seja 165°C (Figura 51a).

Na etapa da mistura com fibra o conjunto agregados+fibras foi aquecido na mesma temperatura de 165°C (Figura 51b).

Na sequência, adicionou-se o cimento asfáltico aos agregados (ou agregados + fibras), promovendo a homogeneização dos materiais (Figura 51c). Registrou-se o peso do cesto vazio (A) (Figura 51d) e depois transferiu-se a mistura não compactada para o cesto, sem perturbação e consolidação, registrando o peso do conjunto cesto + amostra (B) (Figura 51e).

Anotou-se o peso do prato vazio (C) (Figura 51f) e em seguida posicionou-se o conjunto cesto + amostra sobre o prato, levando-os à estufa (Figura 51g). O ensaio foi realizado na temperatura de usinagem (150°C) e a 15°C acima da temperatura de usinagem (165°C), conforme determina a norma. Como foi verificado arrefecimento das amostra superior a 25°C abaixo da temperatura de teste, a permanência na estufa foi de 70 ± 5 minutos, seguindo recomendações da AASHTO T 305.

Por fim, retirou-se o conjunto da estufa, removendo o cesto e pesando o prato com o material drenado (D) (Figura 51h).

O resultado pôde ser obtido através da seguinte Equação 8:

$$\text{Escorrimento (\%)} = \frac{D-C}{B-A} \times 100 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

A = massa do cesto de arame vazio;

B = massa do cesto de arame + amostra;

C = massa do recipiente vazio;

D = massa do recipiente + material drenado.

Este ensaio foi decisivo para a determinação do teor ótimo de fibra que foi utilizado em toda a pesquisa. Testou-se inicialmente uma mistura SMA sem fibra, verificando se o valor do escoamento ultrapassaria o limite estabelecido por norma (0,3%), o que justificaria o emprego da fibra. Como foi observado o descumprimento à norma, testou-se em seguida uma mistura SMA com fibras de bananeira, cortadas em comprimentos de 20mm, nos teores de 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4% e 0,5%, identificando então, o teor ótimo de fibra para a mistura, ou seja, o teor em que a mistura não apresentou escoamento superior a 0,3% em ambas as temperaturas de ensaio. Este teor ótimo de fibra de bananeira foi utilizado para todas as SMAs posteriormente estudadas.

Uma avaliação subsequente do escoamento foi realizada para as SMAs com o uso da fibra de bananeira nos comprimentos de 5mm, 10mm e 15mm, a fim de verificar se para este mesmo teor ótimo de fibra o valor do escoamento das misturas permaneceria abaixo do valor preconizado por norma.

Figura 51: Procedimentos do ensaio de escoamento



3.2.8 Estabilidade Marshall

O valor da estabilidade mede, de forma indireta, a resistência ao cisalhamento, o intertravamento e o atrito proporcionados pela fricção interna dos seus materiais e a coesão entre as partículas da mistura asfáltica.

Seguindo a norma DNIT ME 043/95, os corpos de prova cilíndricos foram colocados em um banho-maria a 60°C por um período de 30 a 40 minutos. Após esse período, foram transferidos para o molde de ruptura e levados à prensa Marshall (Figura 52), onde foram submetidos a uma carga de compressão aplicada por meio dos cabeçotes curvos padronizados com taxa de carregamento de 5 cm/minuto até o rompimento do corpo de prova. A carga máxima correspondente a este ponto, expressa em unidades de força, é denominada estabilidade Marshall. O resultado final foi a média de pelo menos 3 resultados, expresso em kgf.

Figura 52: Ensaio de estabilidade Marshall



3.2.9 Dano por umidade induzida – Lottman Modificado

O ensaio foi realizado de acordo com a norma AASHTO T 283/89 com o intuito de avaliar os danos causados nas misturas asfálticas, tendo em conta o efeito destrutivo da umidade nos corpos-de-prova e consistiu em submetê-los à ação da água e a ciclos de gelo-degelo.

O ensaio resumiu-se em moldar quatro corpos de prova para cada comprimento avaliado e 4 corpos de prova para a mistura sem fibra e dividi-los em dois grupos (condicionados e não condicionados) de dois corpos de prova. Segundo a norma, para o ensaio os corpos de prova devem apresentar volume de vazios de $7 \pm 0,5\%$. Para a obtenção desse volume de vazios foram realizadas tentativas com mudanças do número de giros no compactador giratório, até que esse critério fosse obedecido. Logo, o número de giros necessários para conduzir a mistura a um volume de vazios igual a $7 \pm 0,5\%$ foi de 15 giros.

O grupo condicionado foi colocado em um recipiente com água onde aplicou-se o vácuo até obter grau de saturação entre 70 e 80% (Figura 53a). Após o vácuo, os corpos de prova foram colocados em sacos plásticos com 10ml de água, vedando-os em seguida e levando-os para o congelamento a -18°C por um período de 16 horas (Figura 53b). Após o congelamento, mergulhou-se esse grupo em um banho d'água a 60°C por um tempo de 24 horas (Figura 53c). Passado esse tempo, os corpos de prova tiveram suas temperaturas ajustadas num banho a 25°C (Figura 53d) e em seguida foram retirados dos sacos plásticos e submetidos ao ensaio de resistência à tração na prensa Marshall (RTu) (Figura 53e).

O grupo não condicionado teve apenas sua temperatura ajustada num banho a 25°C e posteriormente foram submetidos ao ensaio de resistência à tração na prensa Marshall (RT). A resistência à tração retida por umidade induzida, foi calculada como sendo a razão entre RTu e RT.

Figura 53: Procedimentos do ensaio de Lottman modificado



3.2.10 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

Este ensaio determina a tensão máxima suportada pela mistura asfáltica antes da sua ruptura e foi realizado seguindo os procedimentos da norma DNIT ME 136/10 e sua

configuração considerou a aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um corpo de prova cilíndrico que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendicularmente a esse diâmetro (Figura 54).

A aplicação das forças ocorreu por meio de frisos metálicos com comprimento igual ao do corpo de prova, com objetivo de garantir a distribuição do carregamento ao longo das duas geratrizes opostas do corpo de prova (Figura 55). O corpo de prova foi então submetido a um carregamento com velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até sua ruptura.

A resistência à tração foi determinada pela Equação 9:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DH} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

σ_t = resistência à tração;

F = carga de ruptura;

D = diâmetro do corpo de prova;

H = altura do corpo de prova.

O resultado final foi a média de pelo menos 3 resultados, expresso em MPa.

Figura 54: Esquema do ensaio de compressão diametral

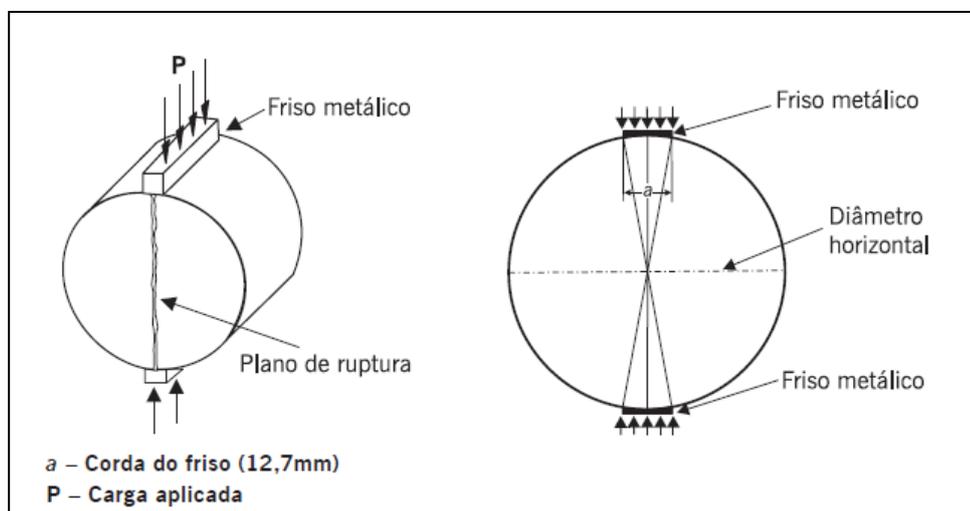


Figura 55: Ensaio de resistência à tração



3.2.11 Cântabro

O arrancamento progressivo de agregados da capa de rolamento por efeito do atrito pneu-pavimento é denominado desgaste, sendo uma patologia comum em revestimentos brasileiros. O ensaio usualmente utilizado para determinação de resistência à desagregação é o ensaio Cântabro.

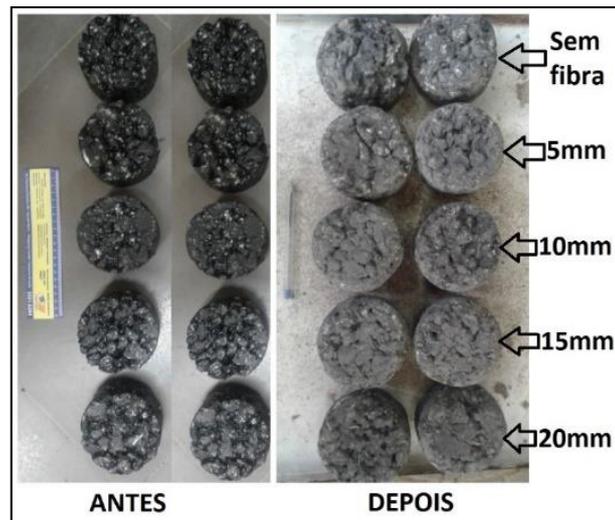
O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNIT – ME 383/99 e consistiu na avaliação da perda por desgaste das misturas empregando o aparelho de abrasão Los Angeles.

Os corpos de prova foram pesados (P) e posteriormente colocados individualmente no aparelho de Abrasão Los Angeles sem nenhuma carga abrasiva, onde foram efetuadas 300 revoluções na velocidade angular de 30 rpm. Após esta etapa foram retirados do tambor e novamente pesados (P'). O aspecto dos corpos de prova antes e após o ensaio pode ser observado na Figura 56.

O percentual de desgaste da mistura asfáltica (A) foi calculado com a seguinte expressão:

$$A (\%) = \frac{P-P'}{P} \times 100 \quad \text{Equação 10}$$

Figura 56: Aspecto dos corpos de prova ante e depois do ensaio



3.2.12 Módulo de resiliência (MR)

A deformação elástica ou recuperável das camadas de pavimentos submetidos a carregamentos repetidos é chamada de deformação resiliente. Para se efetuar a análise de deformabilidade de uma estrutura de pavimento, é necessário conhecer as relações tensão-deformação ou os módulos de resiliência dos materiais que compõem as camadas da mesma (BEZERRA NETO, 2004).

O ensaio do módulo de resiliência para as misturas SMA estudadas foi realizado por meio da norma brasileira NBR 16018/11 na prensa hidráulica UTM-25 da IPC (Figura 57). O princípio do ensaio é baseado na aplicação de uma carga compressiva em formato de onda pulsante (haversine) repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico regular, que gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação, sendo então medido o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada.

Pela NBR 16018/2011 é computado o deslocamento resiliente instantâneo, que é calculado usando a deformação horizontal recuperável que ocorre durante a fase de descarregamento de um ciclo de carga-descarga, sendo igual ao valor resultante do ponto na curva hiperbólica correspondente ao tempo coordenado (valor no eixo x) da interseção subtraído do pico de deslocamento (Figura 58).

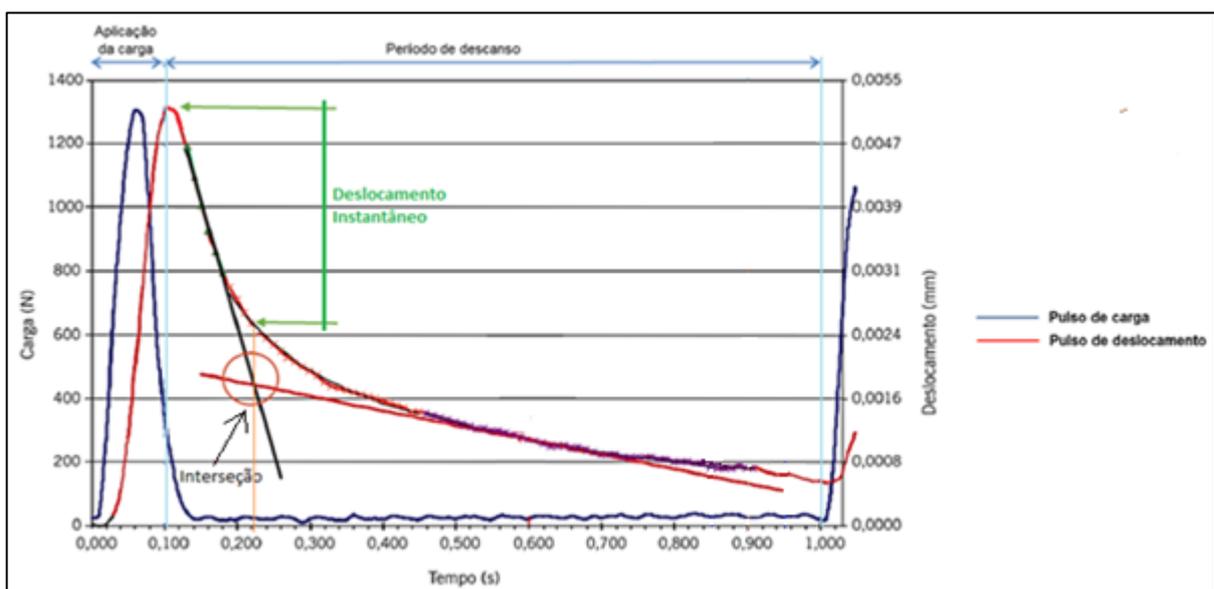
Segundo Motta et al. (1993) a temperatura é o efeito mais importante na determinação do módulo de resiliência, podendo alterar o valor deste de até 12 vezes para o CAP 50/70 e até 4 vezes para o CAP 30/45 quando a temperatura varia de 10 a 35°C. Sendo assim, para a

avaliação da suscetibilidade do módulo de resiliência das misturas SMA frente a variações térmicas, os ensaios foram realizados a 5°C, 25°C e 45°C, temperaturas representativas do clima brasileiro. O procedimento consistiu na aplicação de uma carga igual a 10% da força da RT, numa frequência de 60 ciclos por minuto (1Hz), com o tempo de aplicação de 0,10 segundo e, portanto, com 0,90 segundo de repouso ou descarregamento.

Figura 57: Ensaio de módulo de resiliência



Figura 58: Deslocamentos resilientes instantâneos



Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2008)

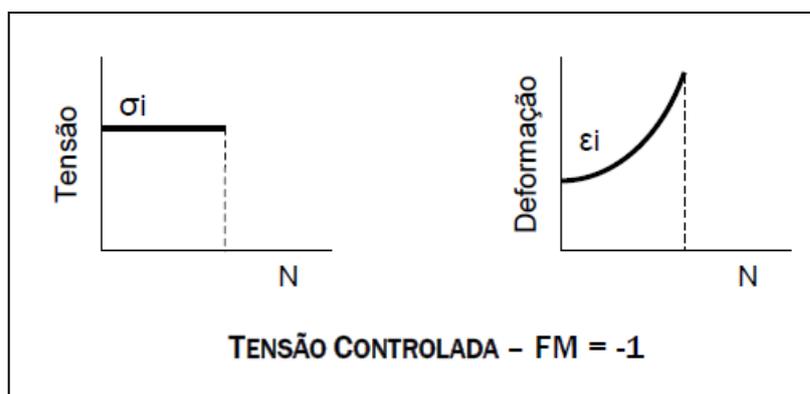
3.2.13 Fadiga por compressão diametral à tensão controlada

Considerando a importância da avaliação da resistência ao aparecimento e propagação de trincas por fadiga em misturas asfálticas, foi realizado o ensaio de fadiga utilizando corpos de prova cilíndricos submetidos a compressão diametral com carga repetida.

Ainda não existe um método preconizado no Brasil para a realização desse ensaio. Segundo Babadopulos et al. (2014) o método mais usual no país para estudar a vida de fadiga dos pavimentos constitui-se em determinar o número de ciclos de carga, aplicada em forma de pulsos, necessário para provocar a falha de amostras cilíndricas a níveis de tensão predefinidos, o que possibilita a construção da curva de Whöler (que é um gráfico de magnitude de tensão por número de ciclos (N), em escala logarítmica).

Nesta pesquisa o ensaio para a determinação da vida de fadiga das SMAs foi realizado à tensão controlada. Segundo Santos (2005) no ensaio de fadiga à tensão controlada a carga aplicada é mantida constante e as deformações resultantes aumentam no decorrer do ensaio (Figura 59). Nesta configuração não é necessário um controle da evolução das deformações durante a execução.

Figura 59: Representação esquemática do comportamento da tensão e da deformação no ensaio de fadiga à tensão controlada



Fonte: Santos (2005)

O ensaio ocorreu na câmara da prensa UTM-25, por compressão diametral à tensão controlada, numa frequência de pulso de 1 Hz, sendo 0,1s para a aplicação da carga senoidal e 0,9s de repouso (Figura 60). A temperatura de ensaio foi de 25°C e foram adotados os níveis de tensão de 30, 40 e 50% da resistência à tração da mistura, obedecendo a capacidade máxima do equipamento que é de 5000N. Inicialmente tentou-se realizar o ensaio nos níveis de tensão

de 20, 30 e 40% da RT, no entanto era demandado muito tempo para a conclusão do ensaio no nível de 20%, o que inviabilizou a utilização deste nessa pesquisa.

Woodside et al. (1998) e Neves Filho (2004) também realizaram ensaio de fadiga a tensão controlada em misturas SMA e adotaram como critério de parada a deformação de 8mm e 3,5mm, respectivamente. Nesta pesquisa adotou-se como critério de parada a deformação de 4mm do corpo de prova, por ser o valor mais usualmente utilizado nos laboratórios brasileiros.

A vida de fadiga das misturas asfálticas SMA estudadas foi expressa em função da diferença de tensões ($\Delta\sigma$) entre a tensão de tração e de compressão e em função do parâmetro ε_i (deformação resiliente), calculados por meio das Equações 11 e 12:

$$\Delta\sigma = \frac{8F}{100\pi dh} \quad \text{Equação 11}$$

$$\varepsilon_i = \frac{(\%RT)}{MR} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

$\Delta\sigma$ = diferença de tensões no centro do corpo de prova (MPa);

ε_i = deformação resiliente específica;

F= carga aplicada (N);

d= diâmetro do corpo de prova (cm);

h= altura do corpo de prova (cm);

RT= resistência à tração (MPa);

MR= módulo de resiliência (MPa);

Com o auxílio do programa Microsoft Excel®, em gráficos dilog, projetou-se as curvas de fadiga $\Delta\sigma \times N$ e $\varepsilon_i \times N$ para cada uma das misturas de acordo com as Equações 13 e 14:

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{k_2} \quad \text{Equação 13}$$

$$N = k_3 \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{k_4} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

N= número de aplicações de carga na ruptura, no fim do ensaio;

$\Delta\sigma$ = diferença de tensões no centro do corpo de prova (MPa);

$k_1 ; k_2 ; k_3$ e $k_4 =$ parâmetros determinados no ensaio;

Figura 60: Ensaio de fadiga



3.2.14 Módulo dinâmico ($|E^*|$)

O Módulo Dinâmico ($|E^*|$) é o valor normal do módulo complexo, calculado dividindo-se a máxima tensão (pico a pico) pela deformação axial recuperável (pico a pico) para um material sujeito a uma carga senoidal, conforme mostrado na Figura 61.

Tanto o ensaio de módulo dinâmico quanto o ensaio de módulo de resiliência oferecem estimativas da rigidez da mistura asfáltica. As principais diferenças entre os dois ensaios é que neste primeiro levam-se em conta as parcelas elásticas e não elásticas das deformações, e utilizam-se carregamentos axiais senoidais, enquanto no módulo de resiliência utilizam-se carregamentos de ondas quadradas em compressão diametral e só a parcela elástica é levada em conta no cálculo do módulo.

A determinação experimental do módulo dinâmico $|E^*|$ (Figura 62) seguiu o método da AASHTO TP-62/2009 e ocorreu por meio da aplicação de uma tensão de compressão senoidal em um corpo de prova de 150mm de altura e de 100mm de diâmetro, em temperaturas e frequências de carga especificadas pela norma. A tensão aplicada e a deformação axial recuperável resultante da amostra foram medidas e usadas para o cálculo do módulo dinâmico.

A série de ensaios para o desenvolvimento das curvas mestra para a análise do desempenho da mistura foi efetuada a 4; 21 e 37° C durante o carregamento, a frequências de 0,1; 0,5; 1; 5; 10 e 25Hz para cada temperatura. Seguiu-se a recomendação da AMPT que sugere eliminar a maior e a menor temperatura (-10°C e 54°C) indicadas na AASHTO TP-62/2009 para a realização do ensaio, devido a capacidade do equipamento.

Cada corpo de prova, individualmente equipado com LVDTs, foi testado para cada uma das 18 combinações de temperatura e frequência de carregamento, começando com a temperatura mais baixa e procedendo para a mais alta. O ensaio a uma dada temperatura começou com a maior frequência de carregamento e prosseguiu para a mais baixa. Para cada temperatura foi aplicada uma carga de contato (P_{\min}) diferente, igual a 5% de um valor típico de carga dinâmica geralmente verificado em cada temperatura, conforme mostra Tabela 31.

Pôde-se, então, estabelecer comparações entre as curvas mestras obtidas de todas as misturas avaliadas, de acordo com suas inclinações. Maiores inclinações ocorrem para materiais mais elásticos.

Figura 61: Exemplificação do cálculo do Módulo dinâmico

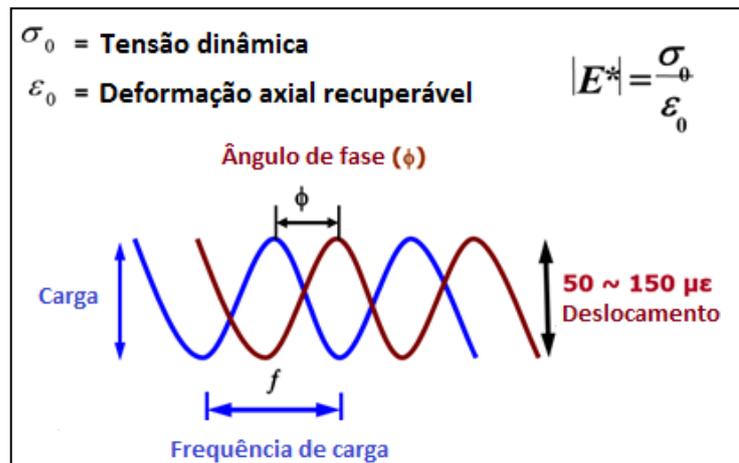


Tabela 31: Nível de tensão referente a cada temperatura

Temperatura, °C	Tensão, kPa
4	700
21	350
37	140

Figura 62: Realização do ensaio de módulo dinâmico



3.2.15 *Flow number* (FN)

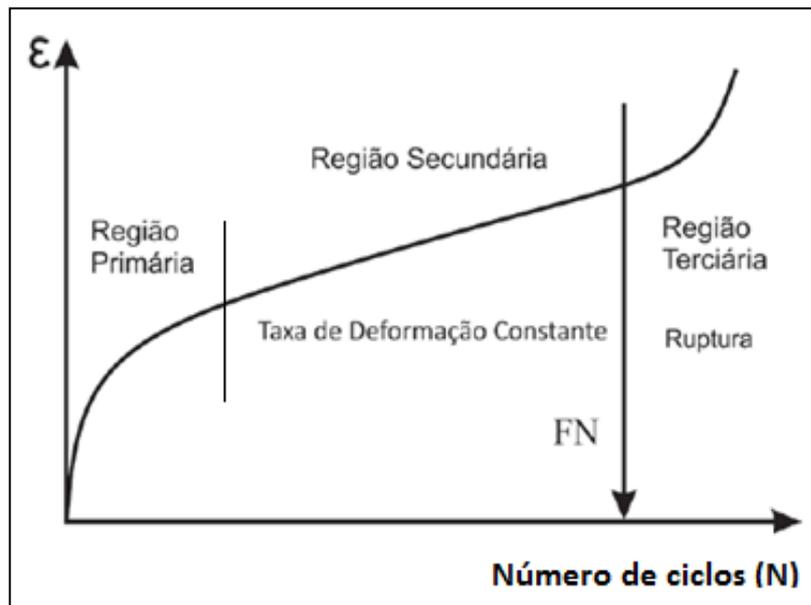
Este ensaio simula a condução de um veículo pesado repetidamente sobre a estrutura do pavimento e oferece como resposta o *flow number* (FN), que é o número de ciclos de carga que o pavimento pode tolerar antes que ocorra a fluência. Quando confinado é denominado Teste triaxial de deformação permanente de carga repetida (TRLPD) e quando realizado sem confinamento é chamado Teste de deformação permanente de carga repetida (RLPD).

O resultado do ensaio é mostrado num gráfico que relaciona deformação permanente com o número de ciclos aplicados. A curva gerada pode ser subdividida em três zonas de deformação: a região primária (côncava para baixo), a região secundária (reta) e a região terciária (côncava para cima), conforme mostrado na Figura 63.

Na região primária a densificação da amostra ensaiada ocorre a uma taxa elevada. Na região secundária a taxa de deformação é praticamente constante e na região terciária a deformação cresce exponencialmente, indicando rompimento da amostra. O número de ciclos onde ocorre a transição entre as zonas secundárias e terciárias é definido como *flow number* (FN).

A partir do ciclo referente ao FN a deformação ocorre a volume constante e a taxa de deformação volta a subir, visto que a amostra não oferece mais resistência aos carregamentos.

Figura 63: Regiões durante o ensaio uniaxial de carga repetida e obtenção do FN



Fonte: adaptada de Witczak et al. (2002)

O teste foi realizado na AMPT, numa temperatura de 60°C e ciclos de carga uniaxial compressiva de 200kPa, aplicados no corpo de prova de 150mm de altura e 10mm de diâmetro dosado segundo a metodologia SUPERPAVE com 7±0,5% de volume de vazios. Para a obtenção desse volume de vazios foram realizadas tentativas com mudanças do número de giros no compactador giratório, até que esse critério fosse obedecido. Logo, o número de giros necessários para conduzir a mistura a um volume de vazios igual a 7±0,5% foi igual a 15 giros.

O carregamento foi aplicado durante um período de 0,1s com repouso de 0,9s, e o critério de parada foi o alcance de 10.000 ciclos ou uma deformação de 50.000 *microstrains*. Quando o ensaio atingiu uma das duas condições, foi dado por encerrado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados da caracterização da fibra de bananeira utilizada nesta pesquisa, dos testes de escorrimento e dos ensaios de propriedades mecânicas da mistura asfáltica SMA com e sem fibra.

4.1 Caracterização da fibra de bananeira

Nessa seção serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização da fibra de bananeira utilizada nessa pesquisa.

4.1.1 Espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX)

A Tabela 32 apresenta os óxidos presentes na fibra de bananeira utilizada nessa pesquisa, no entanto essa composição diz respeito apenas a parte das cinzas. Analisando-se os resultados pode-se observar que tal fibra é constituída por óxido de alumínio (22,78%), óxido de silício (20,99%), óxido de potássio (18,11%), óxido de cálcio (17,79%), óxido de magnésio (12,13%) e baixos teores de óxido de ferro, óxido de zinco e óxido de cobre. Não foi verificada perda ao fogo na amostra ensaiada.

A grande quantidade de óxido de silício observada nos resultados pode estar associada à contaminação da amostra, pois a peneira n° 200, onde o material foi passado na etapa de preparação, também era utilizada para solos.

Tendo-se em vista a inexistência de dados nesta área para a fibra de bananeira, estes dados são significativamente relevantes.

Tabela 32: Composição química da fibra de bananeira

Componentes Químicos	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	ZnO	CuO
%	22,78	20,99	18,11	17,79	12,13	4,01	3,07	1,13

4.1.2 Difração de raio X (DRX)

O difratograma da fibra de bananeira obtido no ensaio de difração de raio X, mostrado na Figura 64, apresentou picos na região dos ângulos de Bragg de intensidade do sinal em $2\theta=18,04^\circ$; $2\theta= 22,60^\circ$; $2\theta= 26,64^\circ$; $2\theta=37,62^\circ$ e $2\theta= 43,88^\circ$. Devido à escassez de dados de difração de raio X para a fibra de bananeira, a interpretação dos resultados baseou-se em informações adquiridas em trabalhos envolvendo fibras naturais.

De acordo com Milanese (2008), Martin et al. (2009), Martins et al. (2011), Pereira et al. (2012), Silva (2013), Oliveira e Mulinari (2014) e Teixeira et al. (2016) os picos observados em $2\theta= 22,60^\circ$ e $2\theta= 26,64^\circ$, sendo esse segundo o de maior intensidade (774 u.a.), correspondem ao plano cristalográfico (002).

Conforme valores de picos de difração encontrados por Milanese (2008), Martin et al. (2009), Martins et al. (2011), Silva (2013), Gonçalves et al. (2014) os picos em $2\theta= 37,62^\circ$ e $2\theta= 43,88^\circ$ presentes no difratograma da bananeira correspondem ao plano (040).

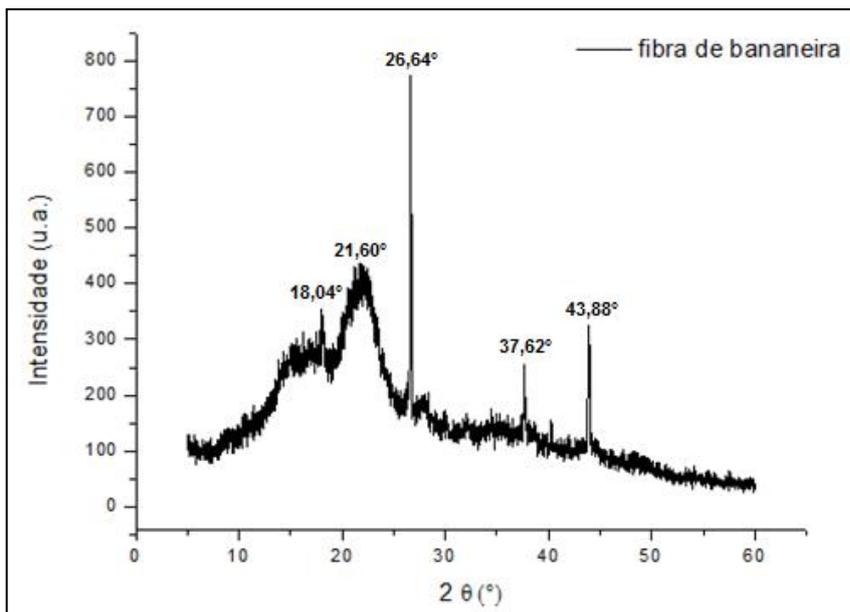
Os planos cristalográficos 002 e 040 são correspondentes à fase cristalina da celulose tipo I (JCPDS, 1986). Hu et al. (1996) realizando estudos com celulose proveniente de algodão observou que a reflexão no plano (002) é atribuída aos planos de rede dos anéis glicosídicos que são os mais densos na estrutura da celulose do tipo I. Conforme Hermans, P. H. & Weidinger (1949) esta é a forma polimórfica da celulose que ocorre naturalmente. Segundo Lengowski (2012) a celulose I – celulose nativa – é à base da estrutura cristalina da célula unitária encontrada nas fibras celulósicas.

Conforme afirma Andrade Júnior (2006), Pereira et al. (2012), Carvalho et al. (2016) a reflexão do pico em $2\theta=18,04^\circ$ observado no difratograma da fibra de bananeira é atribuída a região amorfa da celulose ($18^\circ \leq 2\theta \leq 19^\circ$).

Pelos resultados da difração de raio X da fibra de bananeira utilizada, nota-se que os picos obtidos são referentes aos planos cristalinos característicos de materiais lignocelulósicos (MARTIN et al, 2009), onde se pode observar que a reflexão (002) é a mais intensa.

A não observância da presença de picos de quartzo, principal componente da sílica, no difratograma da fibra de bananeira corroboram o que foi discutido no tópico 3.2.2.1, sobre o fato da alta quantidade de óxido de silício está relacionada à contaminação da amostra

Figura 64: Difratoograma da fibra de bananeira



O índice de cristalinidade (I_c) da fibra de bananeira, apresentado na Tabela 33, foi calculado por meio da Equação 13. Este método foi desenvolvido por Segal et al. (1959) e tem sido largamente utilizado para o estudo de fibras naturais.

$$I_c = \frac{I_{(002)} - I_{am}}{I_{(002)}} \times 100 \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

$I_{(002)}$ = intensidade do máximo de difração, relacionada à parte cristalina ($2\theta = 26,6^\circ$);

I_{am} = intensidade do mínimo de difração, relacionada à parte amorfa ($2\theta = 18,04^\circ$).

Tabela 33: Índice de cristalinidade da fibra de bananeira

$I_{(002)}$ (u.a.)	I_{am} (u.a.)	I_c (%)
774	354	54,26

A variação da resistência à tração e o módulo de elasticidade das fibras naturais estão relacionados diretamente com a variação do índice de cristalinidade (I_c), ou seja, com a quantidade de celulose presente nas fibras uma vez que a celulose é o único componente presente na fibra que se cristaliza. Estudos realizados para correlacionar a estrutura e as propriedades mecânicas em fibras naturais têm demonstrado que o desempenho mecânico delas

depende também de outros parâmetros estruturais como o ângulo ou orientação das microfibrilas, cristais de celulose que compõem a fibra, e do número, comprimento, e largura das células unitárias (MARTIN et al., 2009).

A fibra de bananeira apresentou índice de cristalinidade superior em comparação com o índice de cristalinidade de outras fibras naturais, mostrados na Tabela 34, portanto espera-se que misturas SMA utilizando fibra de bananeira apresente desempenho mecânico superior à SMAs com os tipos de fibras mostrados nesta Tabela 34.

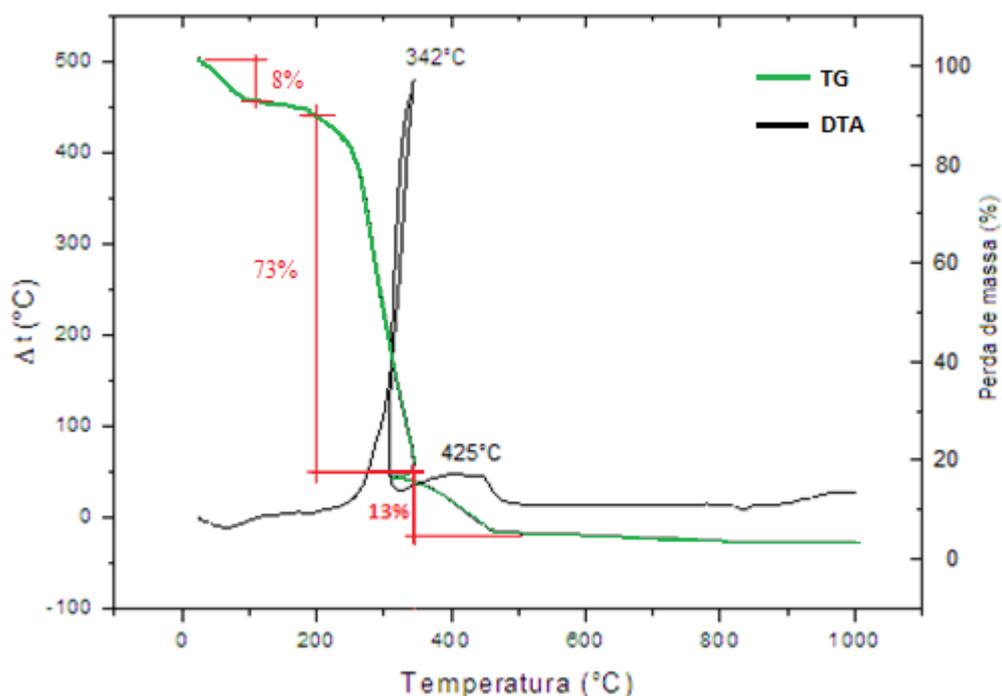
Tabela 34: Índice de cristalinidade de outras fibras naturais

Estudos realizados	Índice de Cristalinidade (%)
Fibra de coco (ROSA et al., 2009)	38,9
Fibra de babaçu (MARTINS et al., 2011)	37,45
Fibra de palmeira (OLIVEIRA e MULINARI, 2014)	39,5
Fibra de bagaço de cana de açúcar (BRANDÃO, 2015)	39,7

4.1.3 Análise térmica

A Figura 65 mostra o termograma da fibra de bananeira, com as curvas TG e DTA.

Figura 65: Termograma da fibra de bananeira



Para a TG, pode-se identificar eventos térmicos associados às perdas de massas, que são representados pelas inflexões da curva. A perda de massa inicial, de aproximadamente 8%, que ocorreu entre 25°C e 100°C é atribuída à decomposição de materiais voláteis presentes na fibra celulósica. Segundo Liu (2009) esses voláteis podem ser umidade, terpenos, álcoois, ésteres, aldeídos, cetonas, ácidos orgânicos, hidrocarbonetos alifáticos e fenóis. Resultados similares a estes foram obtidos para outras fibras lignocelulósicas, como a de piaçava com 8,66% (AQUINO, 2003), a de algodão com 5% (TEIXEIRA et al., 2010), a de coco e de sisal com 4% (RODRIGUES, 2014) e a de bagaço de cana de açúcar com 5% (BRANDÃO, 2015). Gonçalves et al. (2014) encontrou uma perda de aproximadamente 7% para a fibra de bananeira roxa in natura.

A degradação da fibra de bananeira iniciou-se em aproximadamente 200°C e continuou rapidamente com o aumento da temperatura até cerca de 350°C, apresentando perda de massa de 83%, que conforme Rodrigues (2014) está associada à degradação da hemicelulose. A temperatura determinada como início da degradação térmica da fibra de bananeira está de acordo com valores reportados na literatura para outras fibras lignocelulósicas, conforme mostrados na Tabela 35.

A redução de massa observada na TG da fibra da bananeira a partir da temperatura de 350°C até 500°C está relacionada à decomposição da celulose e da lignina (RODRIGUES, 2014).

Tabela 35: Temperatura de início de degradação de algumas fibras lignocelulósicas, obtidas em TG

Fibra	T (°C) de início da degradação
piaçava (AQUINO, 2003)	225
pupunha (MARTINS et al., 2011)	275
coco e sisal (RODRIGUES, 2014)	263
bananeira roxa (GONÇALVES et al., 2014)	250
bagaço de cana de açúcar (BRANDÃO, 2015)	200

Na curva da primeira derivada da perda de massa em função da temperatura (DTA) nota-se a presença de um pico ocorrendo em 342°C que pode estar associado com a degradação da celulose da fibra da bananeira, a qual envolve reações de despolimerização, desidratação e

decomposição das unidades glicosídicas (AQUINO, 2003; TEXEXIRA et al.,2010; GONÇALVES, 2014). Outro pico ocorre na temperatura de 425°C, podendo este possivelmente está relacionado à degradação da lignina que acontece acima de 375°C, conforme informações da literatura (AQUINO, 2003).

Por meio dos resultados de análise térmica entende-se que não há risco de deterioração da fibra de bananeira na confecção da mistura, pois todas as temperaturas a que as fibras são submetidas no processo de mistura e compactação estiveram abaixo da temperatura de início de degradação da fibra (200°C).

4.2 Propriedades das misturas asfálticas SMA

Nessa seção serão apresentados os resultados das propriedades das misturas asfálticas SMA estudadas, no que diz respeito aos ensaios de sensibilidade ao escorrimento e aos ensaios para a obtenção das propriedades mecânicas da mistura.

4.2.1 Sensibilidade ao escorrimento

A utilização deste método permitiu estabelecer a quantidade de material escorrido (gotejado) de amostras de misturas asfálticas SMA não compactadas (com e sem fibra) quando estas foram mantidas a temperaturas elevadas, comparáveis com aquelas usadas durante a produção, estocagem, transporte e espalhamento.

Para a SMA sem aditivo estabilizador foi observado escorrimento excessivo (Figura 66). Na temperatura prevista para a usinagem (150°C) o escorrimento foi de 4,12% e na temperatura acima em 15°C da prevista para a usinagem (165°C) o escorrimento foi de 6,36%, conforme mostrado na Tabela 36. Com isso, constatou-se a necessidade do uso de um estabilizador para reduzir a drenagem de material da mistura SMA, fundamentando assim a adição de fibras do pseudocaulo da bananeira como alternativa.

Figura 66: Escorrimento da mistura SMA sem aditivo estabilizador



Tabela 36: Valores de escorrimento para a SMA sem aditivo estabilizador

Teor de fibra (%)	Escorrimento (%)	
	150°C	165°C
0	4,12	6,36

Num segundo momento, variando-se na mistura a quantidade de fibra de bananeira de comprimento igual a 20mm, buscou-se identificar qual o teor ideal de fibra que reduziria o escorrimento a valores abaixo do 0,3% preconizado por norma. Para isso realizou-se um ensaio para cada teor (0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4% e 0,5%). Os valores encontrados estão mostrados na Tabela 37.

Por meio da Figura 67 e Figura 68 percebe-se que houve um decréscimo da quantidade de material drenado da mistura SMA à medida que se aumentava o teor de fibra nesta e que essa tendência aconteceu nas duas temperaturas de ensaio. Nota-se, nos resultados organizados na Tabela 37, que na temperatura de 150°C o atendimento ao limite de 0,3% de escorrimento aconteceu no teor igual a 0,2% de fibra e nos teores acima deste, no entanto na temperatura de 165°C, para este mesmo teor de 0,2% de fibra, o escorrimento ficou acima do permitido. Como a norma exige obediência ao limite de 0,3% de escorrimento nas duas temperaturas de ensaio, optou-se por utilizar como teor ideal de fibra de bananeira para a mistura SMA estudada o valor de 0,3%, menor teor onde se confirmou o atendimento à norma nas duas temperaturas de ensaio. Este teor ideal foi utilizado durante toda a pesquisa e está de acordo com resultados encontrados na literatura sobre a aplicação de outras fibras naturais em SMA (KUMAR et al., 2011; ODA et al., 2012; DIKSHITH, 2012; VALENÇA, 2012; LEAL, 2013).

Tabela 37: Valores de escorrimento para a SMA com a adição da fibra de bananeira (20mm), variando o seu teor

Teor de fibra (%)	Escorrimento (%)	
	150°C	165°C
0,1	0,81	1,42
0,2	0,11	0,73
0,3	0,05	0,23
0,4	0,03	0,08
0,5	0,01	0,01

Decidiu-se por não escolher um teor de fibra mais elevado pois quanto maior o teor de fibra maior seria o problema de trabalhabilidade, já que durante a confecção das misturas para a realização do ensaio de escorrimento constatou-se que o processo de homogeneização se tornava mais difícil a medida que o teor de fibra na mistura aumentava. Beligni et al. (2000) também verificou que o uso de teores mais elevados (0,5% e 0,7%) resultou numa piora das propriedades mecânicas da mistura (resistência à tração por compressão diametral e a deformação permanente no simulador de tráfego LCPC).

Figura 67: Decréscimo do escorrimento com o aumento do teor de fibra de bananeira (20mm) na mistura SMA

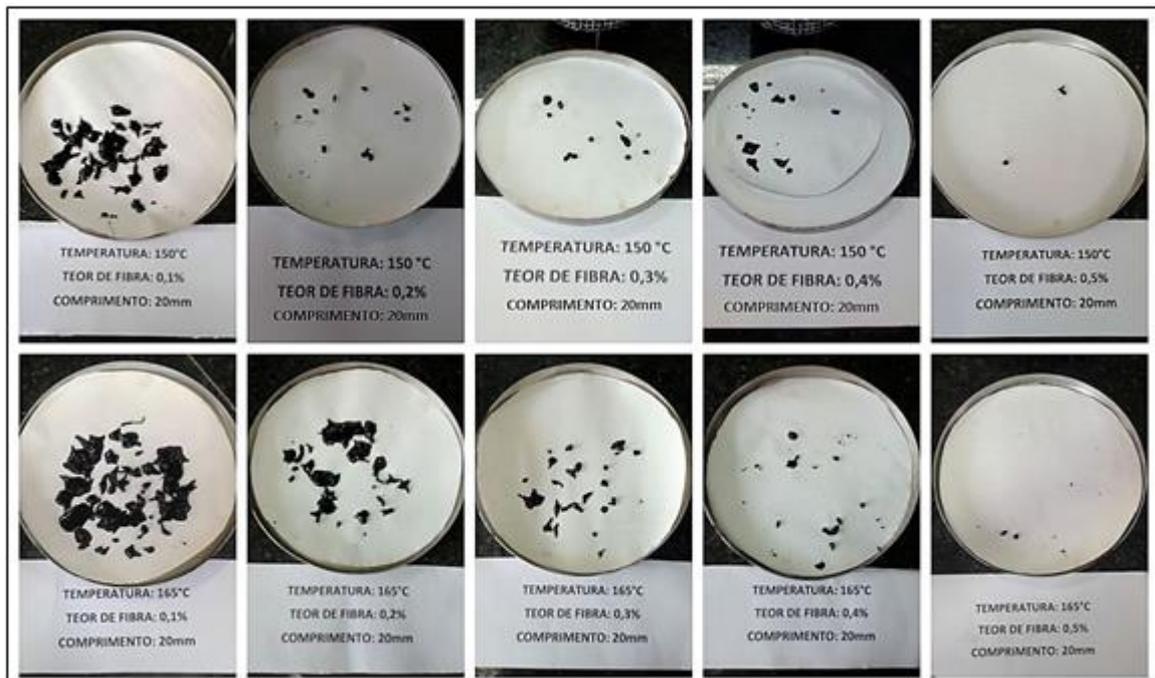
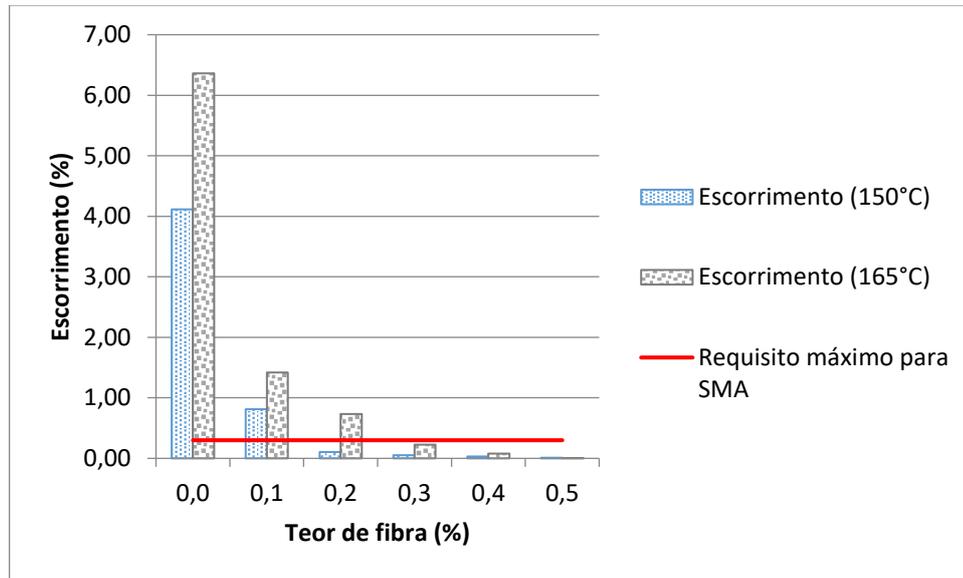


Figura 68: Escorrimento X Teor de fibra de bananeira (20mm)



Num terceiro momento, foi realizada uma nova análise para verificar a influência do comprimento da fibra na sensibilidade ao escorrimento da mistura. Neste foram utilizados tamanhos de fibra de 5mm; 10mm e 15mm no teor ideal de 0,3% escolhido, sendo realizado um ensaio para cada comprimento de fibra adotado. Os resultados referentes ao uso de cada um desses comprimentos, bem como o resultado encontrado anteriormente para o uso do comprimento de 20mm estão mostrados na Tabela 38.

A Figura 69 exibe a tendência crescente do escorrimento da SMA, para as duas temperaturas de ensaio, ao passo que se diminuía o comprimento da fibra de bananeira na mistura. Este resultado está condizente com Leal (2013) que identificou uma elevação do percentual de escorrimento da mistura asfáltica SMA à medida que a dimensão da fibra do bagaço de cana de açúcar utilizada como estabilizador diminuía.

Analisando os dados da Tabela 38, verifica-se que o limite máximo de 0,3% de escorrimento para a SMA foi atendido quando se utilizou fibras de comprimento igual a 20mm, 15mm e 10mm. O uso da fibra de 5mm de comprimento acarretou resultado insatisfatório para a temperatura de 165°C.

Figura 69: Escorrimento X Comprimento de fibra de bananeira (0,3%)

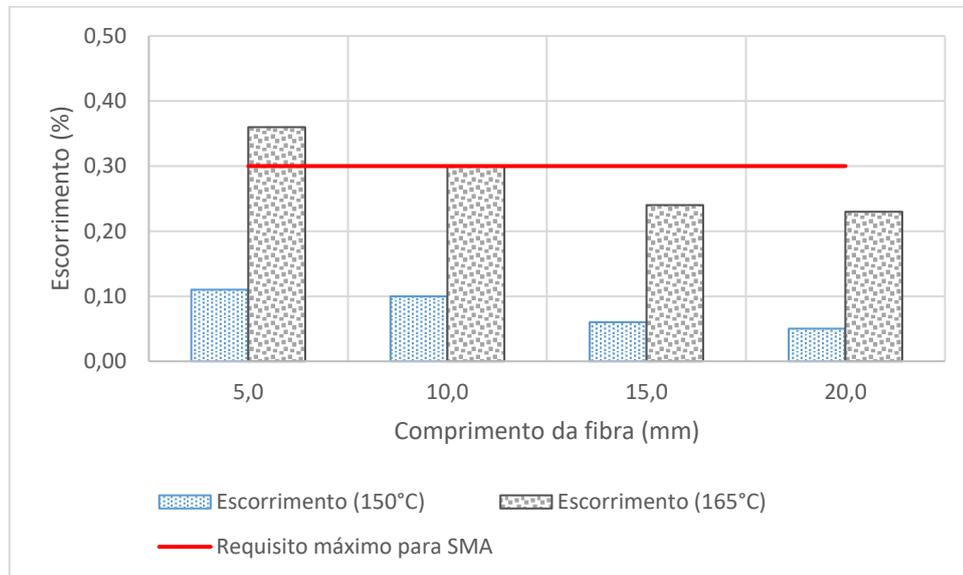


Tabela 38: Valores de escorrimento para a SMA com a adição da fibra de bananeira, variando o seu comprimento

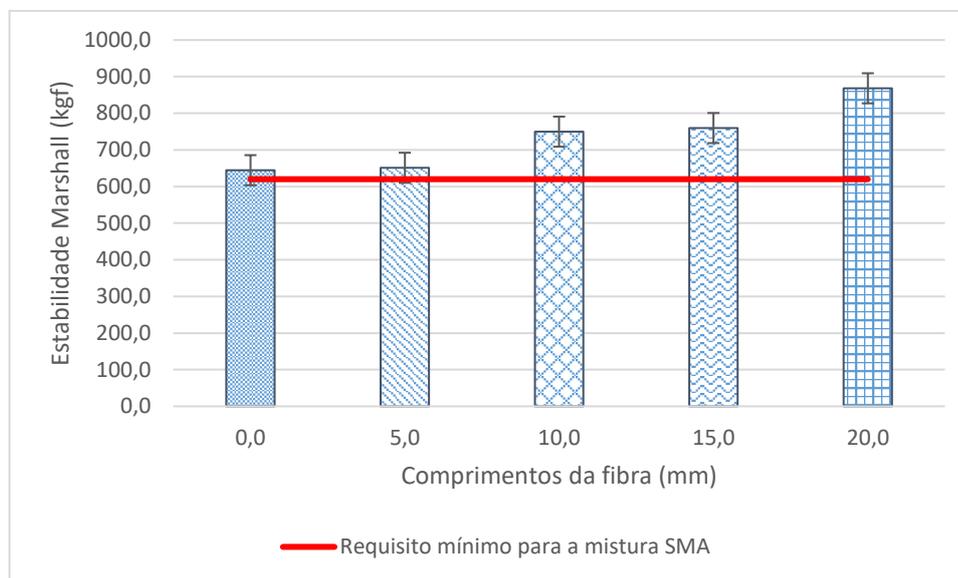
Comprimento de fibra (mm)	Escorrimento (%)	
	150°C	165°C
5,0	0,11	0,36
10,0	0,10	0,30
15,0	0,06	0,24
20,0	0,05	0,23

4.2.2 Estabilidade Marshall

A Figura 70 apresenta os resultados do ensaio de estabilidade Marshall para as misturas asfálticas SMA com e sem fibra de bananeira. Foram ensaiados no mínimo três corpos de prova por condição. A AASHTO MP 8-02/01 adota como requisito para esse tipo de mistura asfáltica um valor de estabilidade mínimo igual a 620 kgf.

Por meio da Figura 70 percebe-se que todas as misturas SMA estudadas, com fibra de bananeira e sem fibra, apresentaram estabilidade superior à determinada como mínima pela norma.

Figura 70: Estabilidade Marshall x Comprimento da fibra (0,3%)



Comparando os resultados da SMA sem fibra com os da SMA com fibra, nota-se que a adição da fibra de bananeira proporcionou um aumento significativo da estabilidade da mistura, indo de encontro à afirmação de Brown (1993) de que essa propriedade não é muito sensível às mudanças nos componentes da SMA. Possivelmente a adição de fibra proporcionou uma maior coesão dos materiais da mistura, pelo fato de conseguir reter o ligante.

A variação do comprimento também influenciou nos resultados desse ensaio, pois a medida que se utilizava um tamanho de fibra maior, a carga necessária à ruptura crescia. A mistura que apresentou melhor resultado de estabilidade foi a que continha fibra de bananeira de 20mm na sua composição. O mesmo comportamento foi observado por Figueiredo Segundo (2017) com a utilização da fibra da renda de bananeira do tipo Pacovan nos comprimentos de 5mm e 20mm na mistura SMA de mesma dosagem e com agregados da mesma procedência dos utilizados nessa pesquisa.

De acordo com Brown (1993) a estabilidade Marshall não reflete o comportamento real das misturas SMA, devido ao fato de que este parâmetro foi criado para avaliar misturas asfálticas densas. Muitos dos ensaios monitorados por Brown (1993) mostraram valores de estabilidade de SMA significativamente mais baixos do que os encontrados para misturas densas convencionais, no entanto o autor salienta que isso não é um indicativo de que a mistura densa é mais estável do que a SMA, sendo a qualidade dessa segunda melhor controlada pelas propriedades volumétricas do que por este parâmetro.

Segundo El-Hage (2012) apesar da estabilidade Marshall ser desconsiderada na maioria das normas de dosagem SMA, normalmente exige-se controles volumétricos e mecânicos rigorosos para atingir o teor de projeto.

Brown (1993), mesmo tendo feito a ressalva de que a estabilidade Marshall não é uma boa previsão de desempenho para SMA, salienta que estabilidade muito baixa pode ser uma advertência de problemas de dosagem tal qual observado em misturas de graduação densa.

4.2.3 Dano por umidade induzida – Lottman modificado

A Figura 71 apresenta os resultados do ensaio de Lottman modificado para as misturas asfálticas SMA com e sem fibra de bananeira. Foram ensaiados quatro corpos de prova (dois condicionados e dois não condicionados) para cada comprimento avaliado e para a mistura sem fibra. A AASHTO MP 8-02/01 adota como requisito mínimo para SMA um valor de resistência à tração retida igual a 70%.

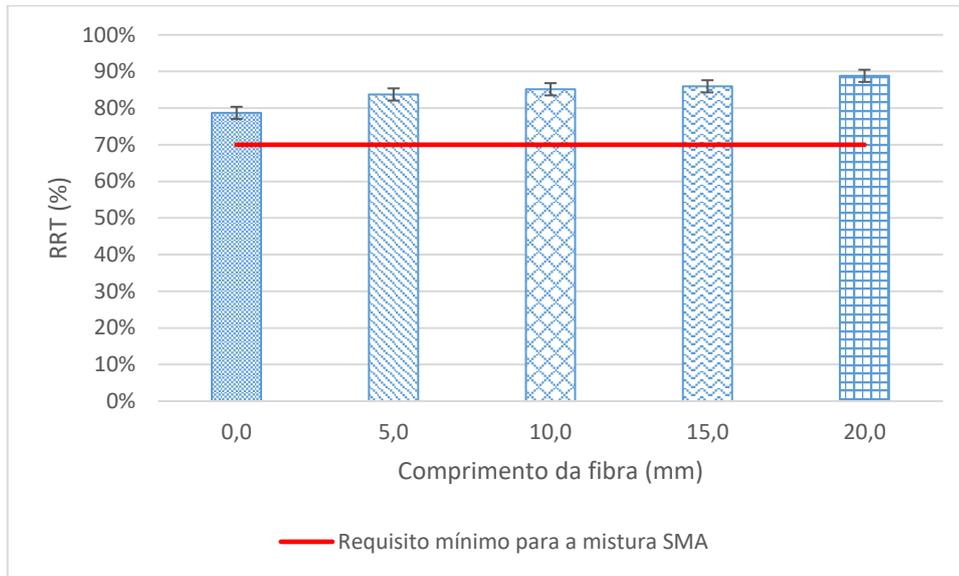
Analisando a Figura 71 percebe-se que todas as misturas SMA estudadas, com fibra de bananeira e sem fibra, apresentaram resistência à tração retida elevada e superior à determinada como mínima pela norma. Como justificativa dessa observação, deve-se levar em consideração o fato das misturas SMA terem em sua composição um alto teor de cal hidratada (5,82%), que é considerada um melhorador de adesividade, fazendo com que a mistura apresente bom comportamento frente à ação deletéria da água, o que confirma o ensaio de adesividade do agregado ao ligante, já que tal ensaio isoladamente não garante que o desempenho da mistura será satisfatório.

Um comparativo dos resultados da SMA sem fibra com os da SMA com fibra, mostra que a adição da fibra de bananeira proporcionou um aumento no valor da resistência à tração retida da mistura, concordando com Vale (2007) que também identificou aumento deste parâmetro nas misturas SMA com a adição de fibras de coco.

O comprimento da fibra influenciou nos resultados do ensaio, onde foi observado um incremento na RRT com o aumento do tamanho da fibra adicionada à mistura. No entanto, percebe-se que o incremento foi pequeno, observado pela proximidade de todos os resultados.

O fato do escorrimento reduzir a espessura da película de asfalto ao redor do agregado pode justificar tanto a maior sensibilidade às reações oxidativas apresentadas pela mistura sem fibra quanto a tendência da RRT verificada quando se variou o comprimento das fibras, pois os resultados estão condizentes com os valores de escorrimento apresentados por cada uma delas.

Figura 71: RRT X Comprimento da fibra (0,3%)



4.2.4 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

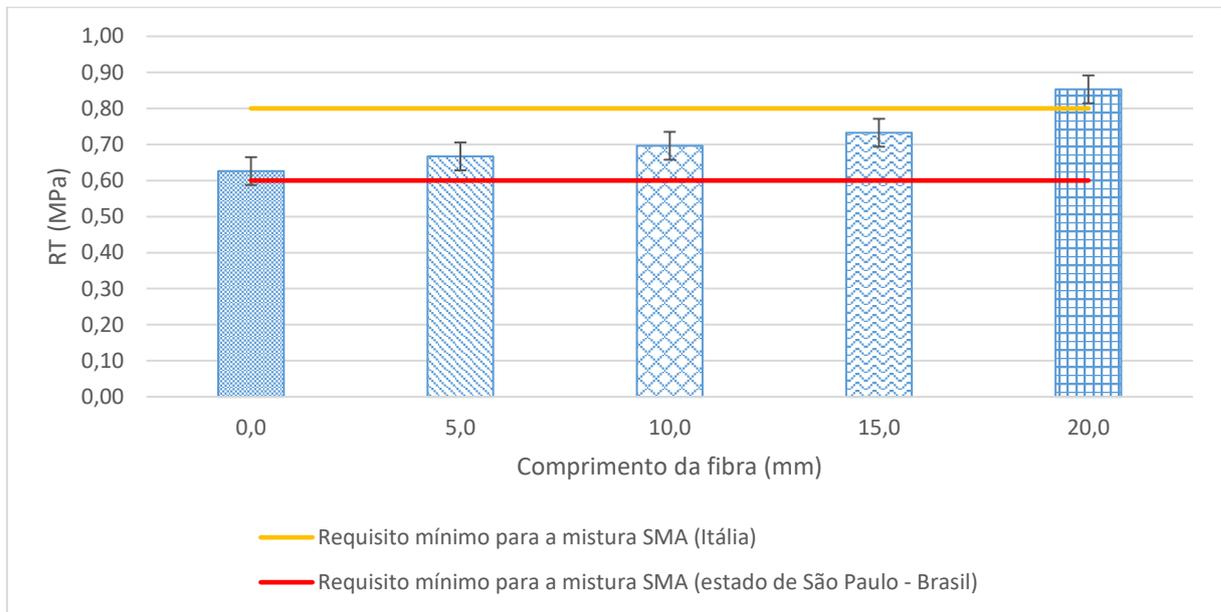
A Figura 72 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para as misturas asfálticas SMA com e sem fibra de bananeira. Foram ensaiados no mínimo três corpos de prova por condição. Os requisitos mínimos de RT para misturas asfálticas SMA variam de uma norma para outra. Mourão (2003) cita em seu estudo que na Itália o valor mínimo de RT para SMA é de 0,8MPa. O DER de São Paulo, por meio da especificação ET-DE-P00/031, adota 0,6MPa como requisito mínimo.

A Figura 72 mostra que todas as misturas SMA estudadas, com fibra de bananeira e sem fibra, apresentaram resistência à tração superior ao mínimo estabelecido pelo DNIT de São Paulo. O critério da norma italiana foi atendido somente pela mistura com a adição da fibra de 20mm de comprimento.

A adição da fibra de bananeira contribuiu para o aumento da resistência à tração da mistura SMA, tal qual o observado por Vale (2007) com a adição de fibra de coco, Valença (2012) com a de carauá e por Figueiredo Segundo (2017) com a fibra da renda de bananeira do tipo Pacovan. Tal fato pode estar associado ao índice de cristalinidade da fibra, que confere a ela resistência, podendo esta parcela ter sido somada à resistência da mistura. Como justificativa dessa possibilidade tem-se que foi visto no tópico 4.1.2 que a fibra de bananeira apresenta um índice de cristalinidade maior do que a fibra de coco e essa superioridade refletiu nos resultados de RT das misturas com a utilização dessas duas fibras, pois nesta pesquisa a RT da SMA com

fibra de bananeira foi 22% maior do que a da SMA sem fibra e na pesquisa de Vale (2007) a RT da SMA com fibra de coco foi 6% maior do que a SMA sem fibra.

Figura 72: RT X Comprimento da fibra (0,3%)



A resistência à tração das misturas foi influenciada pelo comprimento da fibra. Observou-se que quanto maior o comprimento da fibra adicionada, maior a tensão de ruptura da mistura. A SMA com fibra de 20mm de comprimento foi a que apresentou melhor desempenho frente aos esforços de compressão indireta impostos durante o ensaio.

4.2.5 Cântabro

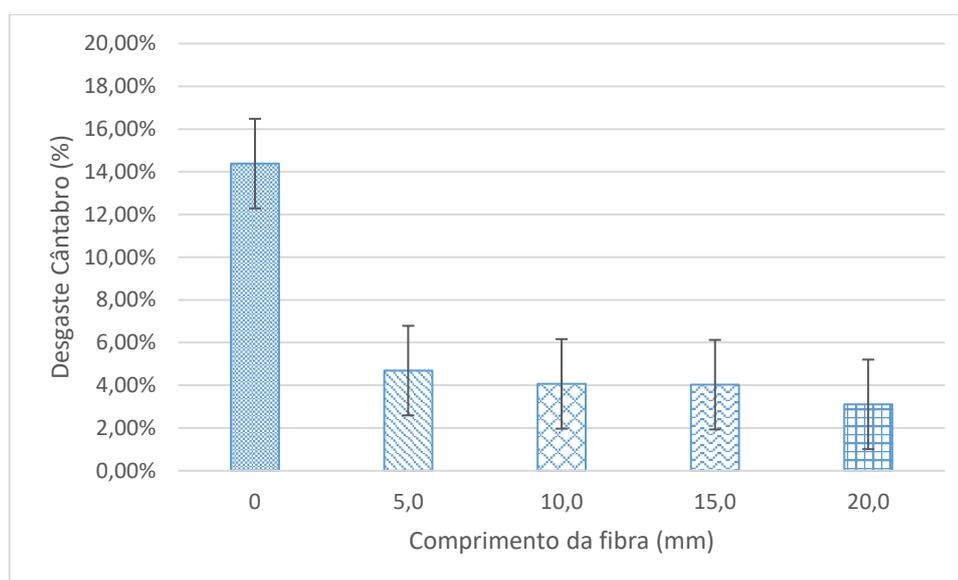
A Figura 73 apresenta os resultados do ensaio de Cântabro para as misturas asfálticas SMA com e sem fibra de bananeira. Foram ensaiados no mínimo três corpos de prova por condição.

Analisando os resultados, percebe-se que a SMA sem fibra apresentou um desgaste elevado e que houve uma queda brusca desse desgaste (9,69%) quando a fibra de bananeira foi inserida na mistura. Woodside et al. (1998) também verificou que a adição de fibra de celulose granulada reduziu em 6,1% a perda por desgaste. Segundo o autor, isso implica que a adição de fibra melhora a coesão da SMA, conforme discutido no item 4.2.2, tornando-a resistente às forças de desintegração.

O fato da abrasão Los Angeles da brita 9,5mm ter sido superior ao valor estabelecido como requisito máximo para misturas SMA pode ter influenciado nos resultados de desgaste Cântabro das misturas.

Com relação ao comprimento da fibra, percebe-se que o mesmo não influenciou nos resultados, pois houve semelhança entre o desgaste das misturas para todas as condições de comprimento avaliados.

Figura 73: Cântabro X Comprimento da fibra (0,3%)



4.2.6 Módulo de resiliência (MR)

A Figura 74, Figura 75 e Figura 76 mostram os resultados do ensaio de módulo de resiliência para as misturas asfálticas SMA com e sem fibra de bananeira. Foram ensaiados no mínimo três corpos de prova por condição.

Alguns fatores influenciam na estimativa do módulo de resiliência como o tipo de mistura, a faixa granulométrica (sendo maior quanto mais grossa for a faixa adotada), o tipo de ligante (sendo maior quanto menor a penetração do asfalto ou maior a sua viscosidade), a temperatura de ensaio (sendo maior quanto menor for a temperatura), a temperatura e a energia de compactação, as propriedades volumétricas, entre outras variáveis. No entanto, tal parâmetro não é muito sensível ao teor de asfalto, dentro da faixa normal de dosagem (MARQUES, 2004; BERNUCCI et al., 2008).

Figura 74: MR instantâneo (5°C) X Comprimento da fibra (0,3%)

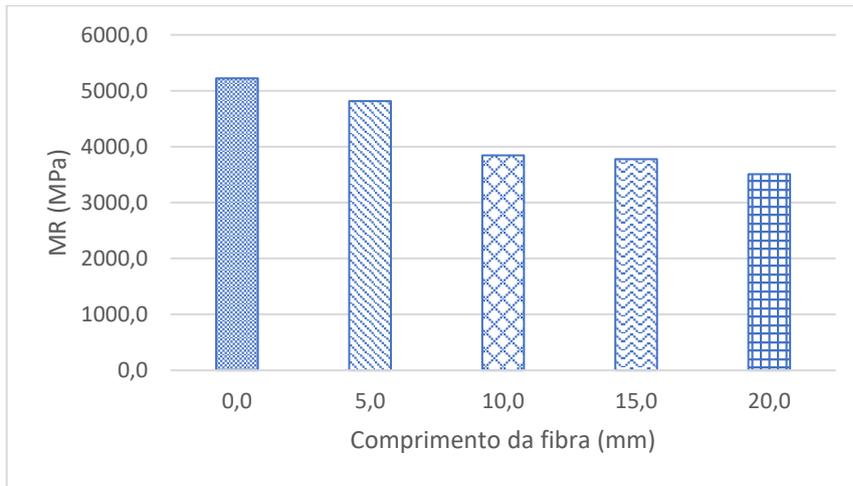


Figura 75: MR instantâneo (25°C) X Comprimento da fibra (0,3%)

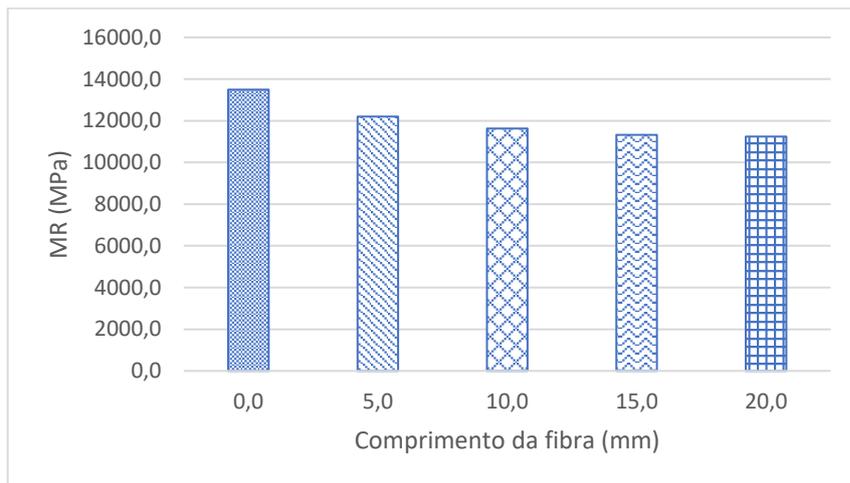
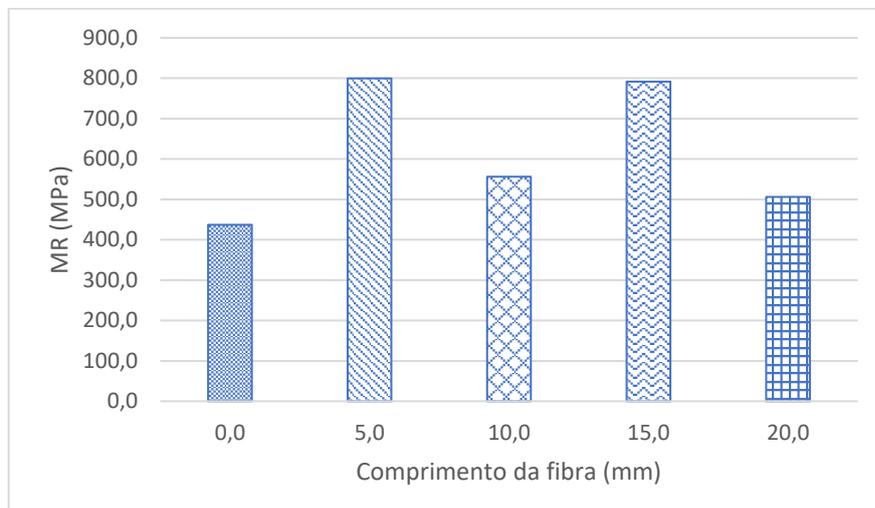


Figura 76: MR instantâneo (45°C) X Comprimento da fibra (0,3%)



Segundo Bernucci et al. (2008) valores típicos de MR encontrados no Brasil para misturas SMA pertencentes às faixas 9,5mm e 12,5mm, na temperatura de ensaio de 25°C, são 3367 MPa e 4747 MPa, respectivamente. Nesta pesquisa foi utilizada a faixa de 19mm, onde na mesma temperatura de ensaio de 25°C foram encontrados valores na ordem de 5000MPa, confirmando o pressuposto de que quanto mais grossa for a faixa granulométrica escolhida, maior o valor do MR.

A adição de fibra promoveu uma redução no valor do MR da mistura, sendo essa mesma situação observada por Vale (2007) com a introdução de fibras de coco em SMA. Horst (2000) apud Mourão (2003) afirma que existe uma tendência das fibras adicionadas à SMA aumentarem a viscosidade do ligante, evitando que este escorra do agregado antes da compactação. Isso se contrapõe à realidade observada, pois caso a inserção da fibra acarretasse aumento da viscosidade do ligante os resultados de MR das misturas com fibra se sobrepujariam aos resultados de MR da mistura sem fibra, já que, como já visto anteriormente, maiores valores de viscosidade do ligante induzem a maiores valores de módulo de resiliência. Portanto, a diminuição do escorrimento da SMA com a adição da fibra, comprovado no tópico 4.2.1, não está relacionado ao fato da fibra aumentar a viscosidade do ligante e sim à própria capacidade da mesma de absorver e de formar de uma rede tridimensional que retém o ligante e estabiliza a mistura.

Esse aumento da rigidez da mistura sem fibra pode ser entendido considerando o que foi discutido no tópico 4.2.3, pois o fato do escorrimento reduzir a espessura do asfalto em torno do agregado, além de aumentar a sensibilidade a reações oxidativas, também torna a mistura mais frágil, ou seja, menos flexível.

Com relação à influência do comprimento da fibra nos valores de MR, para as temperaturas de 5°C e 25°C, a tendência foi de redução do módulo de resiliência com o aumento do tamanho da fibra na mistura. No entanto, a diferença entre os valores das misturas com fibra de 10mm e 15mm de comprimento não foi tão perceptível.

De um modo geral, observou-se também que a capacidade da mistura SMA de absorver energia quando deformada elasticamente e liberá-la quando descarregada sofre grande influência da variação de temperatura, independente da adição ou não de fibra. Percebeu-se alta susceptibilidade da mistura SMA a variações térmicas, comprovada na redução significativa dos valores de MR, tanto o instantâneo quanto o total, de todas as misturas estudadas à medida que se aumentava a temperatura, constatando também a afirmação já mencionada de que o

aumento do MR de misturas asfálticas é inversamente proporcional ao aumento de temperatura de ensaio.

Para a temperatura mais alta (45°C) houve uma queda brusca do MR e grande aleatoriedade dos resultados, que fugiram das tendências constatadas nas outras temperaturas e comentadas anteriormente, tornando inviável a sua interpretação nesse patamar térmico. O alto teor de ligante presente nas misturas pode justificar esse ocorrido, pois a consistência do ligante é uma função direta da temperatura e com o aumento da mesma o valor da viscosidade desse material é reduzido, desestabilizando a mistura.

Kamal et al. (2005) observou diminuição do valor do MR de um CBUQ de cerca de 85% com apenas um aumento de 15°C (ou seja, de 25 a 40°C). Nesta pesquisa, com o aumento de 25°C para 45°C, a diminuição foi na ordem de 90% para a SMA sem fibra e de 80% para todas as SMAs com fibra, o que revela que a fibra ofereceu certo impedimento de redução da rigidez da mistura frente ao aumento da temperatura.

Conforme Brown et al. (2010) o módulo de resiliência de misturas asfálticas faz referência ao módulo de elasticidade deste material, de forma que quanto mais rígido, maior o MR. Todavia, a literatura ressalta que uma maior rigidez não necessariamente indica maior resistência, fato que pode ser atestado nos resultados desta presente pesquisa que tem mostrado que a mistura sem fibra apresenta resistência inferior à mistura com fibra de bananeira, mesmo tendo apresentado MR superior. Brown et al. (2010) comentam que os materiais mais frágeis podem apresentar maior dureza e uma baixa resistência. Da mesma forma, materiais mais flexíveis podem ter baixa dureza, porém alta resistência.

4.2.7 Fadiga por compressão diametral à tensão controlada

As curvas de vida de fadiga $\Delta\sigma \times N$ e $\varepsilon_i \times N$ estão mostradas na Figura 77 e Figura 78. Para cada uma das curvas foi possível gerar as equações que melhor se adequaram as respectivas linhas de tendência de formato igual às expressões mostradas no tópico 3.2.13, bem como mostrar o coeficiente de determinação R^2 de cada linha de tendência, correspondente à qualidade do ajuste do modelo em relação aos pontos e os parâmetros K_1 , K_2 , K_3 e K_4 das equações. A Tabela 39 mostra os resultados obtidos.

Pelas curvas mostradas na Figura 77 e na Figura 78 observa-se que para algumas misturas houve uma grande variação dos valores de N para um mesmo nível de tensão, devido aos fatores apresentados no tópico 3.2.5.2.

Por meio da Tabela 39 nota-se que o modelo que apresentou menor dispersão de resultados nas duas curvas de vida de fadiga, ou seja, aquele com R^2 mais próximo de 1, foi o da mistura SMA com fibras de bananeira de 5mm de comprimento. A SMA com fibra de 15mm foi a que exibiu o menor R^2 , no entanto todas as misturas apresentaram bons coeficientes de determinação.

Com relação ao coeficiente K_2 que indica a inclinação da curva $\Delta\sigma \times N$, Mourão (2003) encontrou valores entre 3,18 e 4,38 para misturas SMA variando o ligante e o fíler e Neves Filho (2004) encontrou valores entre 3,28 e 4,61 para misturas SMA variando o CAP. Na presente pesquisa foram encontrados valores entre 2,20 e 5,76, que revelam que algumas misturas possuem curva $\Delta\sigma \times N$ com baixa declividade e outras possuem curvas $\Delta\sigma \times N$ com alta declividade. Isso indica que algumas SMAs avaliadas apresentaram comportamento semelhante para baixas e altas diferenças de tensões (para as curvas com baixa declividade) e outras apresentaram resistência à fadiga maior somente para diferença de tensões baixas (para as curvas com alta declividade).

Observando a Figura 77 e os coeficientes de inclinação (K_2) encontrados na Tabela 39 verifica-se que a mistura SMA sem fibra é a mais resistente a fadiga a baixas tensões e a mistura SMA com fibra de 15mm foi a que apresentou maior resistência a altas tensões, seguida da mistura com fibra de 20mm. Com relação ao resultado da mistura sem fibra, se a análise fosse baseada somente nos valores de módulo de resiliência isoladamente, apresentados no tópico 4.2.6, tal resultado de vida de fadiga seria esperado, porque essa mistura foi a que apresentou maior MR indicando maior rigidez e segundo Santos (2005) o acréscimo nos parâmetros que tendem a aumentar a rigidez do material resulta, nos ensaio à tensão controlada (TC), em uma maior vida de fadiga. Existe uma incerteza em torno do resultado da SMA com fibra de 15mm, pois como visto anteriormente foi a que apresentou menor valor de R

Na Figura 78 são mostradas as curvas de vida de fadiga $\epsilon_i \times N$, onde a deformação resiliente pondera a interferência do módulo de resiliência inicial da mistura. Por meio do coeficiente de inclinação (K_4) das curvas, nota-se comportamento idêntico ao observado na análise das curvas $\Delta\sigma \times N$: para deformações resilientes baixas a SMA sem fibra apresentou melhor desempenho, e para deformações resilientes altas as SMAs com 15mm e 20mm foram as que suportaram maior número de aplicações de carga (N), salientando a mesma ressalva anterior sobre o baixo R^2 da mistura com fibra de 15mm.

Figura 77: Vida de Fadiga x Diferença de Tensões

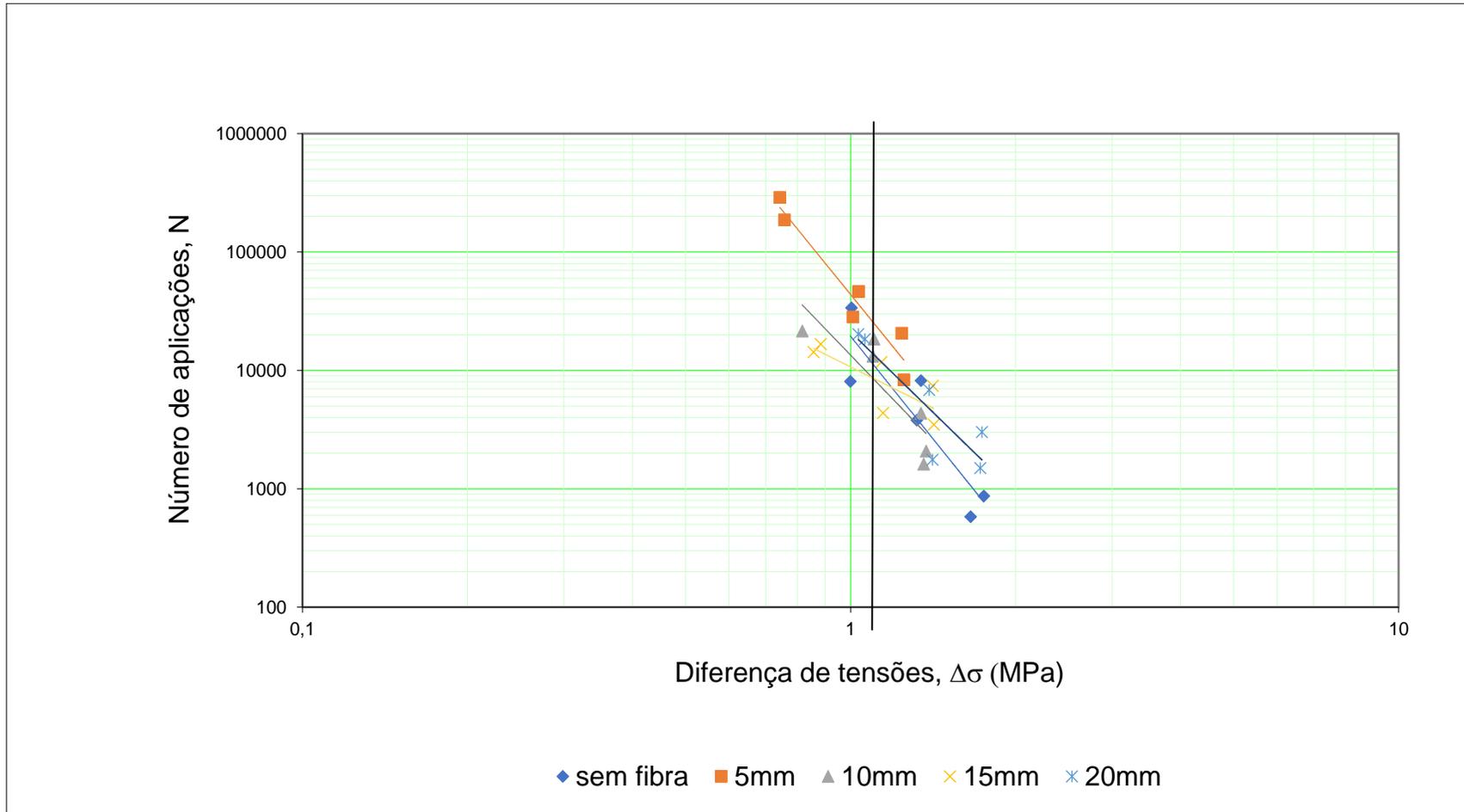


Figura 78: Vida de Fadiga x Deformação específica resiliente

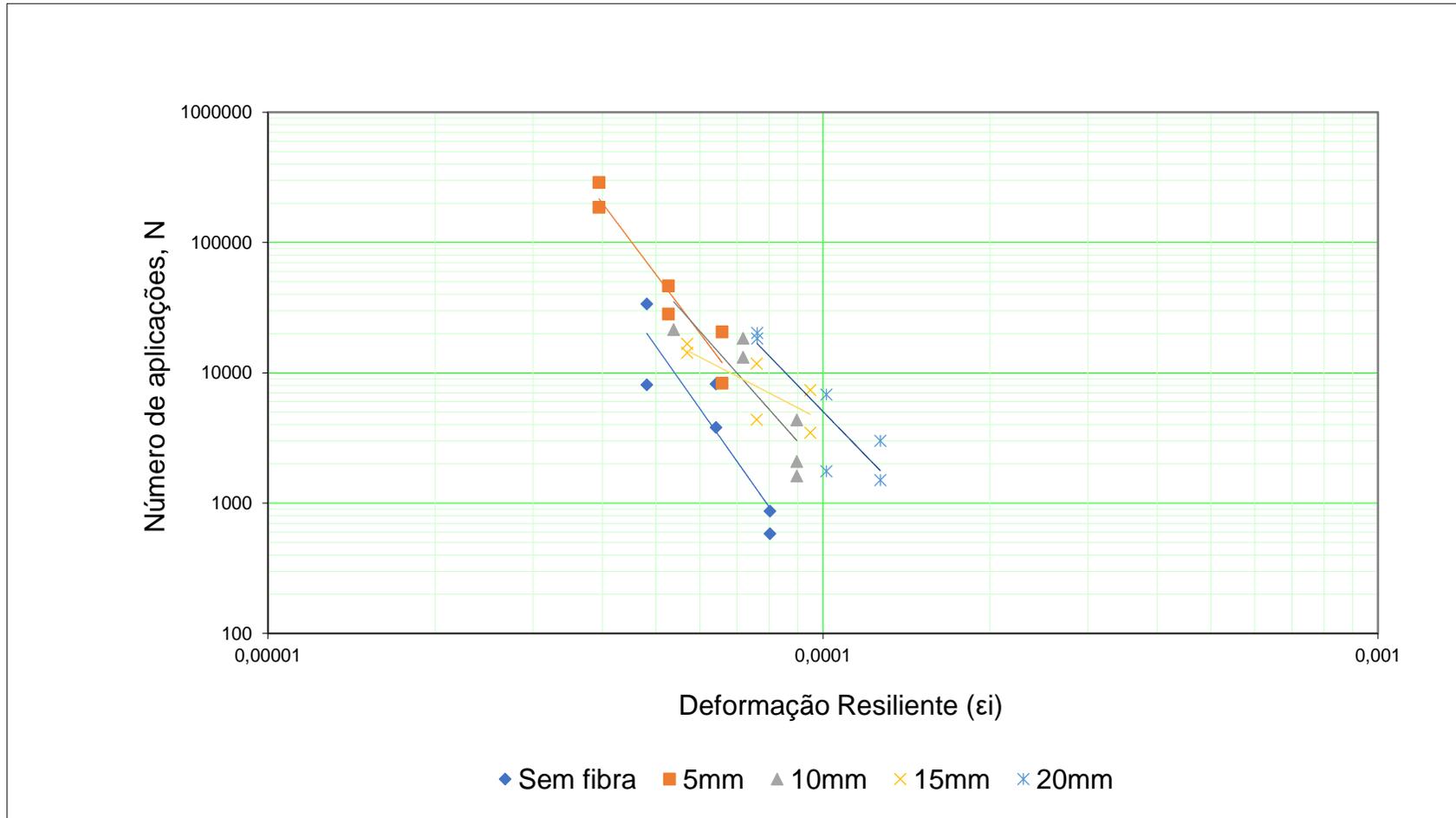


Tabela 39: Resumo das características das curvas de vida de fadiga das misturas SMA avaliadas

Mistura SMA	Equações	R ²	Parâmetros	
Sem fibra	$\Delta\sigma \times N$	0,8117	K₁	K₂
	$19456 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{5,762}$		19456	5,762
	$\Delta\sigma \times \varepsilon_i$	0,8256	K₃	K₄
	$2 \times 10^{-22} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{6,044}$		2×10^{-22}	6,044
5mm	$\Delta\sigma \times N$	0,9303	K₁	K₂
	$43822 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{5,702}$		43822	5,702
	$\Delta\sigma \times \varepsilon_i$	0,9225	K₃	K₄
	$2 \times 10^{-20} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{5,672}$		2×10^{-20}	5,672
10mm	$\Delta\sigma \times N$	0,7371	K₁	K₂
	$13469 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{4,809}$		13469	4,809
	$\Delta\sigma \times \varepsilon_i$	0,7488	K₃	K₄
	$1 \times 10^{-16} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{4,805}$		1×10^{-16}	4,805
15mm	$\Delta\sigma \times N$	0,6154	K₁	K₂
	$10705 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{2,311}$		10705	2,311
	$\Delta\sigma \times \varepsilon_i$	0,6118	K₃	K₄
	$7 \times 10^{-06} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{2,204}$		7×10^{-06}	2,204
20mm	$\Delta\sigma \times N$	0,792	K₁	K₂
	$21117 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{4,509}$		21117	4,509
	$\Delta\sigma \times \varepsilon_i$	0,776	K₃	K₄
	$1 \times 10^{-14} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{4,396}$		1×10^{-14}	4,396

4.2.8 Módulo dinâmico (E^*)

As curvas mestras das misturas asfálticas foram elaboradas a partir dos dados de módulo dinâmico obtidos nas três temperaturas e seis frequências, por meio do processo de superposição tempo temperatura na temperatura de referência de 21°C. Para o traçado, adotou-se o método apresentado no documento “E*, Dynamic Modulus: Test Protocol – Problems and Solutions” do Departamento de Transportes dos EUA. A Figura 79, Figura 80, Figura 81, Figura 82 e Figura 83 mostram as curvas mestras das misturas SMA com e sem fibra de bananeira e a Figura 84 apresenta todas as curvas mestras reunidas num único gráfico.

Por ser uma medida de rigidez, assim como o MR, o módulo dinâmico também é influenciado pela temperatura. Observando as curvas mestras individuais (Figura 79, Figura 80, Figura 81, Figura 82 e Figura 83) bem como a reunião de todas elas (Figura 84) percebe-se que todas as misturas SMA avaliadas apresentaram comportamentos semelhantes no que diz respeito à queda da rigidez à medida que a temperatura aumentava, assim como aconteceu no ensaio de módulo de resiliência. Percebe-se também que a rigidez de todas as misturas também caiu à medida que a frequência de aplicação de carga diminuía.

Figura 79: Curva mestra da SMA sem fibra

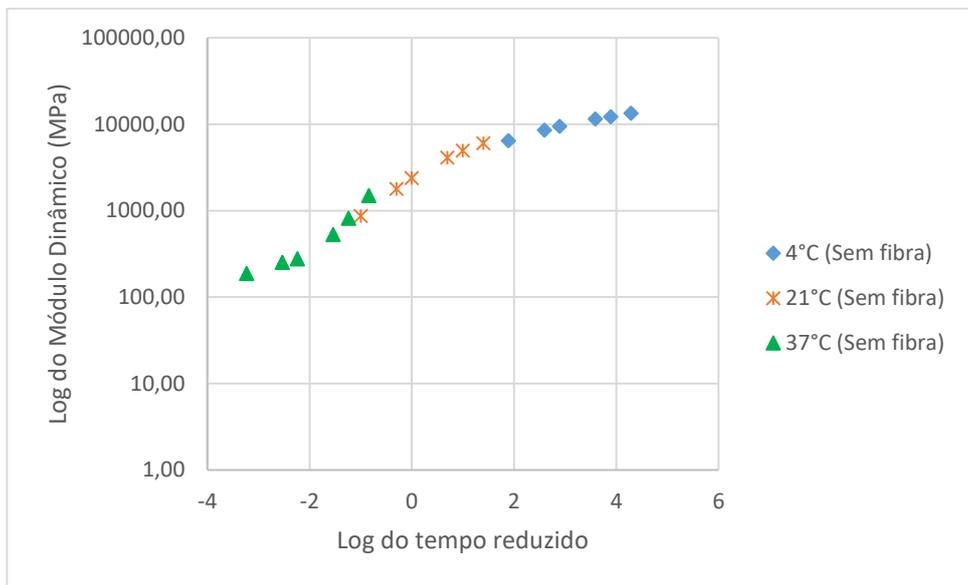


Figura 80: Curva mestra da SMA com fibra de 5mm

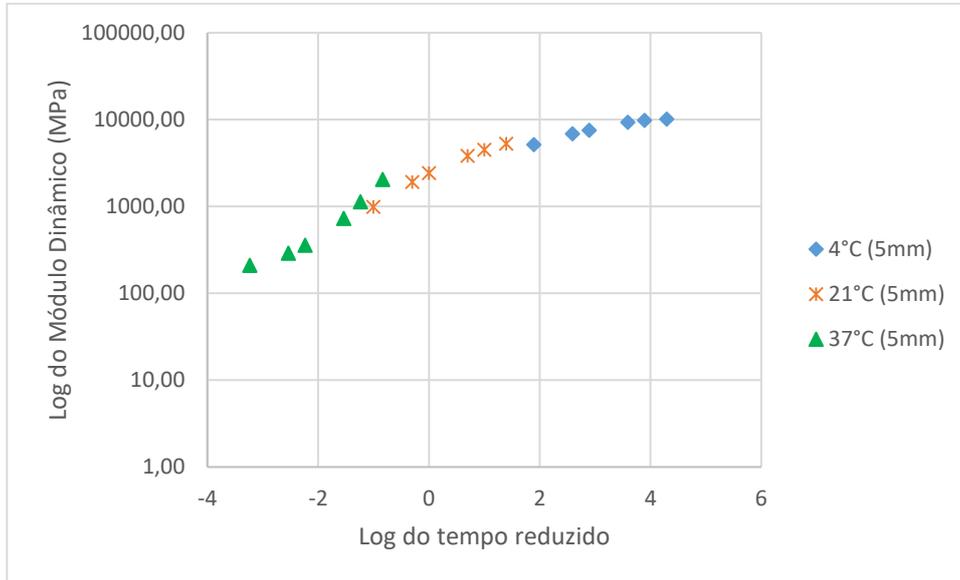


Figura 81: Curva mestra da SMA com fibra de 10mm

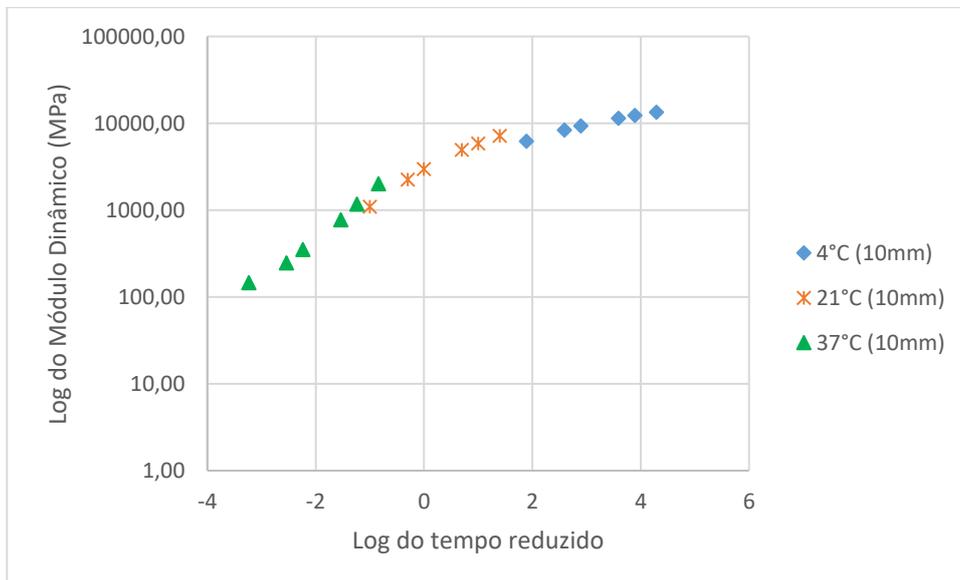


Figura 82: Curva mestra da SMA com fibra de 15mm

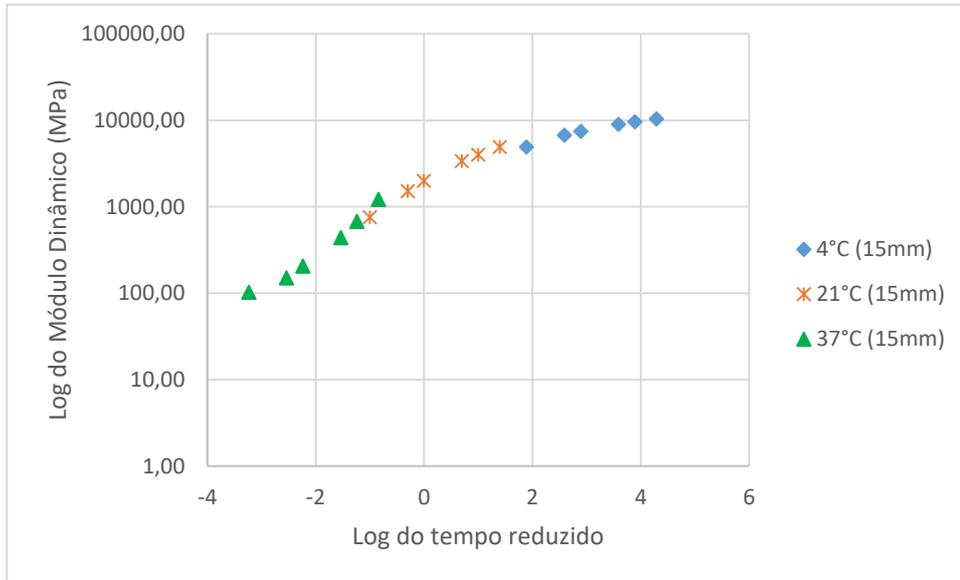


Figura 83: Curva mestra da SMA com fibra de 20mm

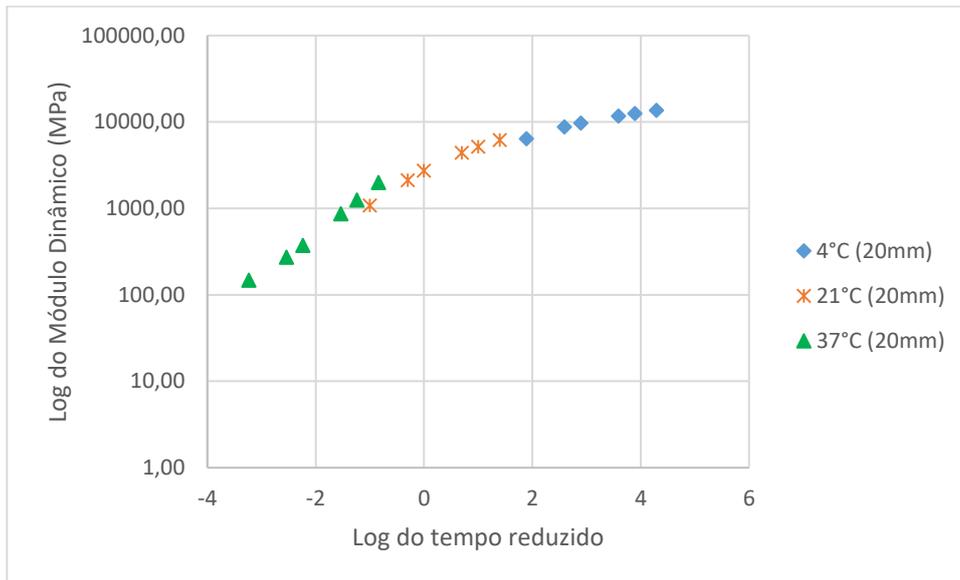
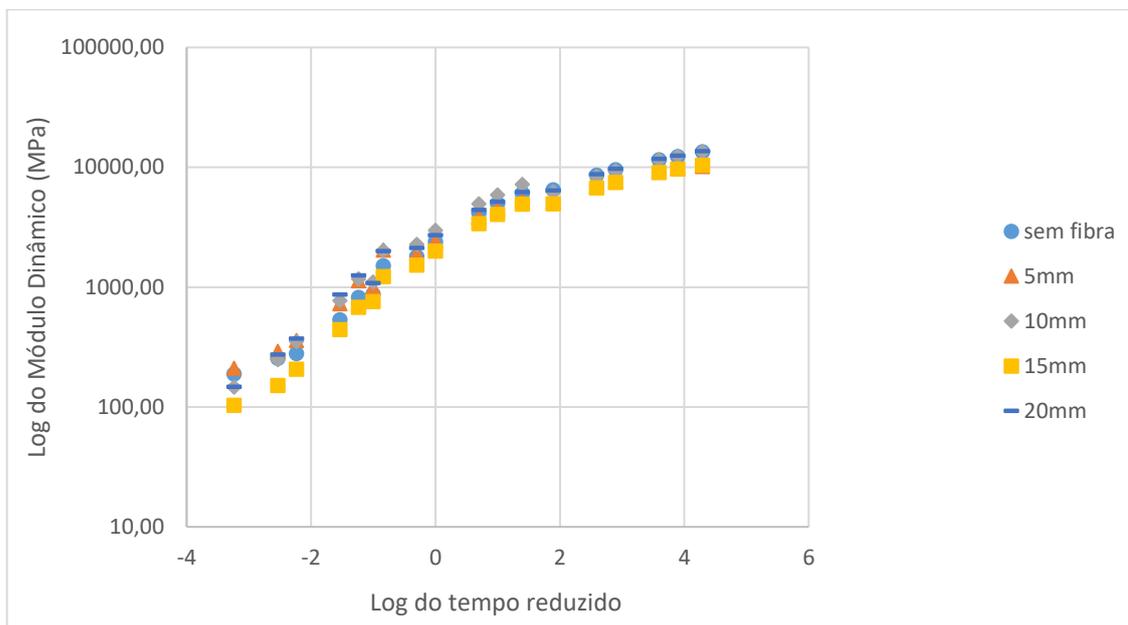


Figura 84: Curvas mestras de todas as SMAs avaliadas



Optou-se também por representar os resultados do ensaio de módulo dinâmico de todas as misturas SMA por temperatura de ensaio (Figura 85, Figura 86, Figura 87). Percebe-se que a introdução da fibra de bananeira, assim como o comprimento desta fibra, afetaram o parâmetro de rigidez da mistura SMA avaliada por meio da aplicação de carga senoidal em diferentes frequências, sendo a SMA com fibra de 20mm a que apresentou maiores valores de módulo dinâmico na temperatura mais baixa e na temperatura mais alta.

Figura 85: Módulo dinâmico das SMAs (4°C)

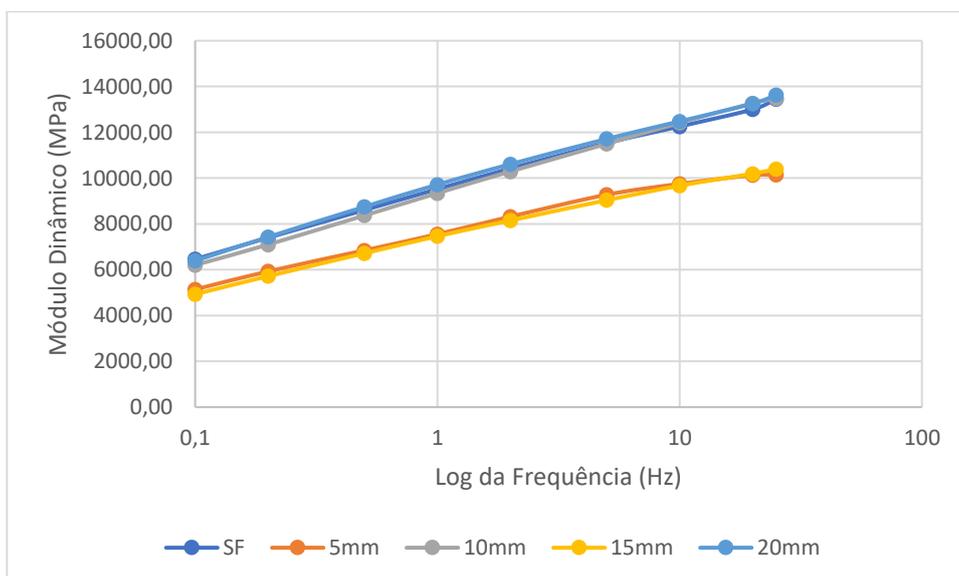


Figura 86: Módulo dinâmico das SMAs (21°C)

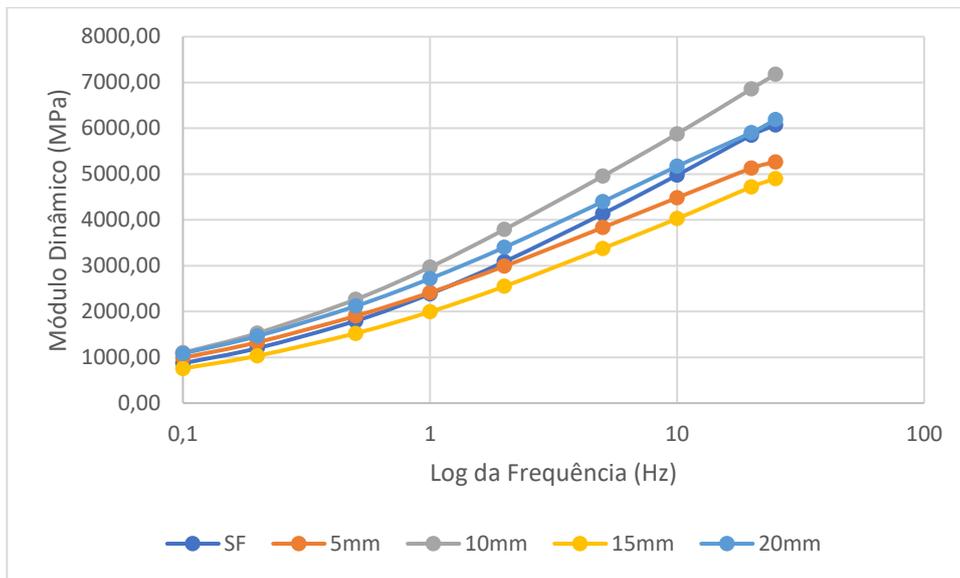
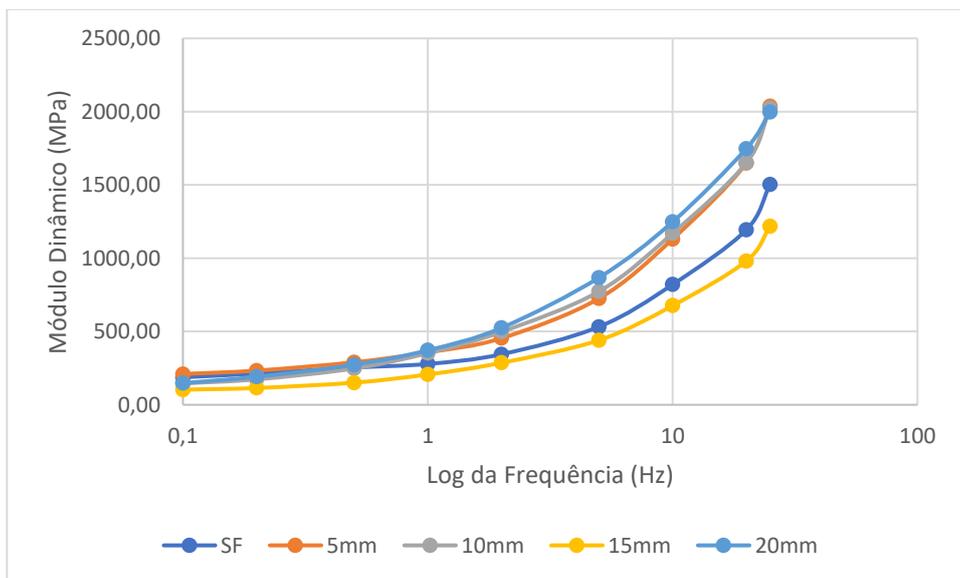


Figura 87: Módulo dinâmico das SMAs (37°C)



A Figura 88, Figura 89, Figura 90 os ângulos de fase referentes às frequências de carregamento de todas as misturas SMA estudadas, em cada temperatura de ensaio. O ângulo de fase (diferença entre o pulso de tensão e o pulso de deformação) é uma propriedade viscoelásticas das misturas asfálticas.

Figura 88: Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (T=4°C)

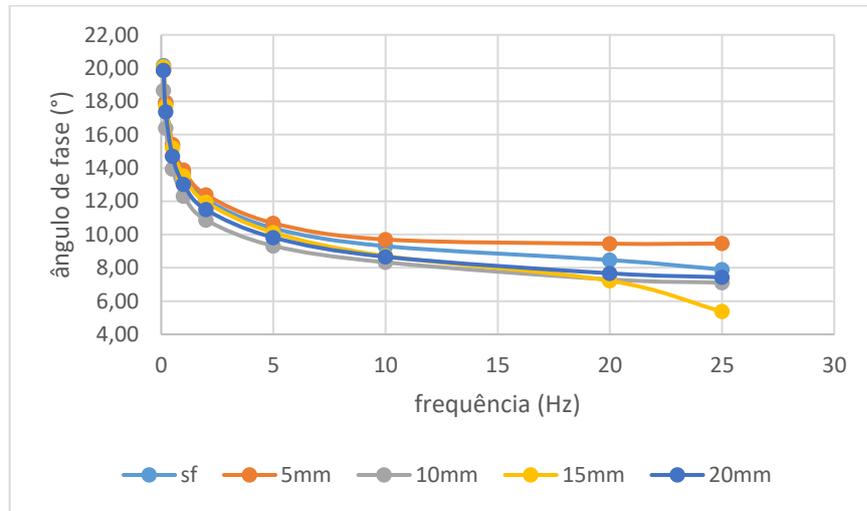


Figura 89: Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (T=21°C)

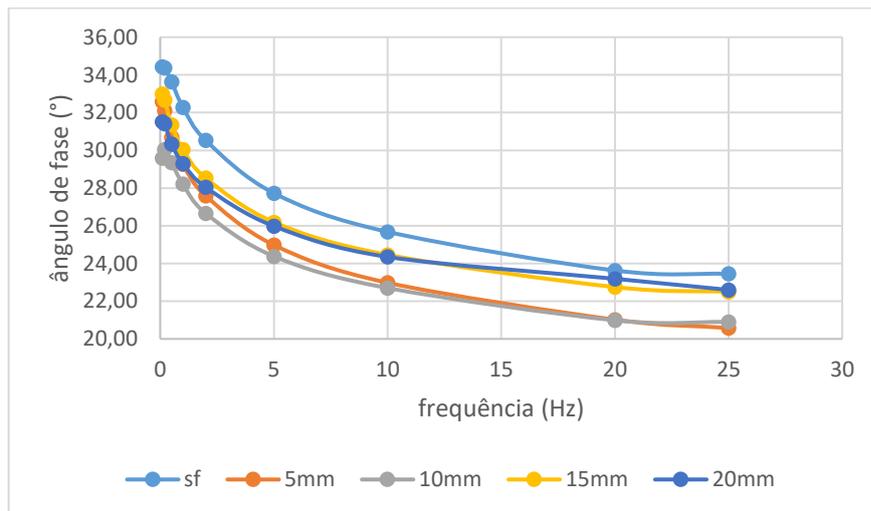
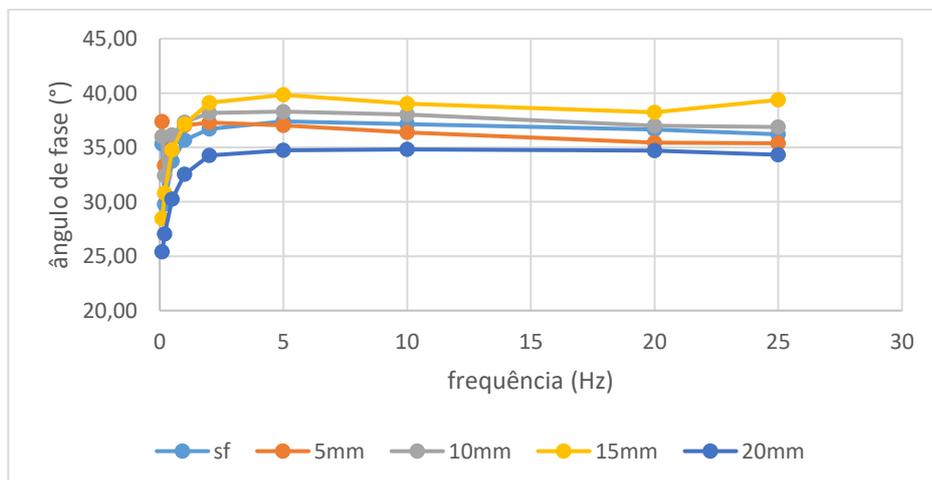


Figura 90: Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (T=37°C)



Para todas as misturas SMA analisadas, observou-se inicialmente que o ângulo de fase aumenta com o aumento da temperatura e diminui com o aumento da frequência. No entanto essa tendência acontece até a temperatura atingir 37° C, pois nesta foi verificado que o ângulo de fase diminuiu em baixas frequências para essa temperatura mais elevada e aumentou com o aumento da frequência. Segundo Ali et al. (2016), em menor temperatura, o ângulo de fase aumenta o que sugere que a maior parte da energia é dissipada no comportamento viscoelástico da mistura, o que implica dizer que a relação entre o ângulo de fase em baixa temperatura e alta frequência é atribuída ao ligante, seguindo a tendência deste. O ângulo de fase a alta temperatura e baixa frequência é afetado pelo agregado e a maior parte da energia é atribuída à interação ligante-agregado que tende a diminuir o ângulo de fase.

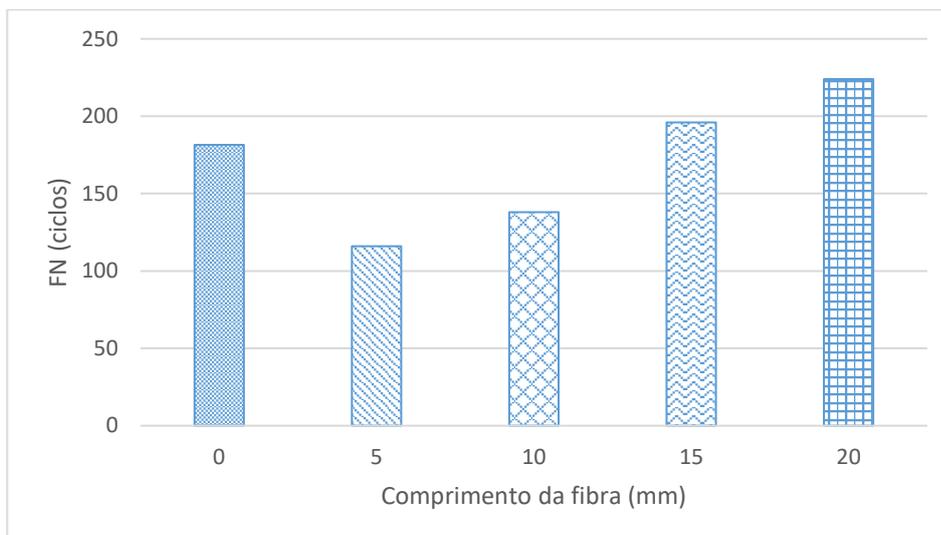
4.2.9 Flow number (FN)

A Figura 91 apresenta os resultados do ensaio Flow number para as misturas asfálticas SMA com e sem fibra de bananeira.

Percebe-se que as SMAs contendo fibra de bananeira com comprimento de 20mm e 15mm foram as que apresentarem resultados superiores de FN, ou seja, suportaram um maior número de ciclos de carregamento até chegar no ponto de transição da zona com taxa de deformação permanente constante para a zona de ruptura, indicando assim maior resistência à deformação permanente.

Tal resultado seguiu a mesma tendência do ensaio de fadiga, onde as misturas com fibra de 20mm e 15mm, para altas taxas de tensão e altas taxas de deformação resiliente, apresentaram maior resistência à ruptura. Figueiredo Segundo (2017) usou a mesma dosagem e os mesmos agregados da SMA dessa pesquisa, utilizando fibra da renda da bananeira do tipo Pacovan nos comprimentos de 5mm e 20mm e também verificou que quanto maior o comprimento da fibra na mistura, maior o número de ciclos suportados até a transição para a zona de ruptura.

Figura 91: Resultado do ensaio de Flow number



Conforme mostrado na Tabela 40, o Advanced Asphalt Technologies (2011) e Bonaquist (2012) mostram valores recomendados de Flow number em quatro regiões de tráfego distinto (leve, médio, pesado e extremamente pesado). De acordo com os valores de FN obtidos, segundo essa tabela, todas as misturas avaliadas nessa pesquisa podem ser submetidas ao tráfego de intensidade pesada, exceto a SMA com fibra de 5mm.

Tabela 40: Valores mínimos de Flow number para diferentes níveis de tráfego

Pesquisas	Tráfego			
	Leve	Médio	Pesado	Extremamente Pesado
	< 3x10 ⁶	< 3x10 ⁶ ; 1x10 ⁷	1x10 ⁷ ; 3x10 ⁷	> 3x10 ⁷
Advanced Asphalt Technologies (2011)	-	53	190	740
Bonaquist (2012)	15	50	135	415

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste tópico serão apresentadas as conclusões obtidas por meio dessa pesquisa, bem como sugestões para pesquisas futuras envolvendo o mesmo objeto de estudo.

5.1 Conclusões

Por meio da análise dos resultados obtidos nessa pesquisa, conclui-se que:

- a fibra de bananeira pode ser utilizada em misturas asfálticas, desde que as temperaturas de trabalho não excedam 200°C (temperatura de início da degradação da fibra);
- quanto à sensibilidade ao escorrimento da mistura, observou-se que a fibra de bananeira proporciona uma redução significativa do escorrimento e que o teor ótimo desta fibra (0,3%) foi compatível com os valores encontrados na literatura quando da utilização de outras fibras naturais. Além disto, verificou-se que o comprimento da fibra tem influência no valor de escorrimento da SMA, onde maiores comprimentos induzem a uma maior redução deste;
- todas as misturas SMA estudadas, com fibra de bananeira e sem fibra, apresentaram estabilidade Marshall, RRT e RT acima dos valores mínimos estabelecidos pelas normas, no entanto as misturas com fibra apresentaram melhor desempenho em comparação com a sem fibra, havendo incremento de todos esses parâmetros supracitados à medida que se aumentava o comprimento da fibra na mistura. A SMA com fibra de bananeira com 20mm de comprimento foi a que apresentou os melhores resultados nesses três ensaios;
- o acréscimo de resistência à tração nas misturas com fibra pode estar associado ao índice de cristalinidade da fibra de bananeira, que confere a ela uma maior resistência podendo esta ter sido somada à resistência da mistura;
- houve uma queda brusca do desgaste (9,69%) da mistura com a adição da fibra, sendo mais acentuado quanto maior o comprimento da fibra;
- a adição de fibra promoveu uma redução no valor do MR da SMA, ou seja, uma redução da sua rigidez avaliada por meio da aplicação de pulsos de carga e descarga, que foi mais acentuada quanto maior o comprimento de fibra empregado. Observou-se também uma tendência de redução dos valores de MR de todas as misturas com o acréscimo da

temperatura, que pode ter sido influenciada pela maior quantidade de ligante demandado pela SMA;

- no ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada notou-se grande variabilidade dos valores de N para todas as misturas. No entanto, pelas curvas de vida de fadiga encontradas, a SMA sem fibra foi a mais resistente a fadiga a baixas tensões e baixas deformações resilientes e a mistura SMA com fibra de 15mm foi a que apresentou maior resistência a altas tensões e altas deformações resilientes, seguida da mistura com fibra de 20mm. O resultado da SMA com fibra de 15mm pode ter sido afetado pela grande dispersão dos valores de N, comprovada pelo baixo valor do R^2 exibido pela curva dessa mistura em comparação às outras;
- no ensaio de módulo dinâmico, assim como no ensaio de módulo de resiliência, observou-se sensibilidade dos resultados à variação de temperatura, sendo menor a rigidez das misturas à medida que a temperatura aumentava. A mistura SMA com fibra de 20mm de comprimento foi a que apresentou maior $|E^*|$ na temperatura mais alta e na temperatura mais baixa;
- os resultados de *flow number* para as SMAs com 20mm e 15mm foram os maiores, seguindo a mesma tendência dos resultados encontrados no ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada. Os FNs encontrados também indicaram que as misturas SMAs avaliadas podem ser aplicadas em regiões de tráfego de intensidade pesada, com exceção da mistura com fibra de 5mm.

De um modo geral, a fibra do pseudocaule da bananeira do tipo Pacovan pode ser uma alternativa viável e ecologicamente correta de material estabilizador em misturas asfálticas do tipo SMA, tanto pela sua capacidade de controle do escorrimento como pelas melhorias proporcionadas à mistura em termos de resistência a solicitações estáticas e dinâmicas e de resistência às deformações permanentes, ao desgaste e ao dano por umidade. O comprimento de fibra de bananeira de 20mm foi o que propiciou melhor desempenho à SMA, mesmo sendo aquele que ofereceu maior dificuldade na trabalhabilidade.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

Tendo em vista os resultados obtidos nesta dissertação, são sugeridos os seguintes tópicos para estudos futuros:

- a) realizar uma dosagem para cada comprimento de fibra avaliado, a fim de verificar a influência do comprimento da fibra nos parâmetros volumétricos da mistura;
- b) avaliar misturas asfálticas SMA de tamanho máximo nominal menor (9,5mm e 12,5mm) utilizando a mesma fibra de bananeira;
- c) estudar as propriedades de escoamento e mecânicas de SMA com o uso de fibras de bananeira que não seja Pacovan, para fins comparativos com os resultados obtidos nessa pesquisa;
- d) comparar propriedades da SMA com fibras de bananeira com SMA utilizando asfalto modificado por polímero;
- e) avaliar a influência de diferentes fíleres no desempenho mecânico de misturas asfálticas SMA com fibra de bananeira;
- f) avaliar a sensibilidade da mistura asfáltica SMA quanto à resistência à deformação permanente em simulador de tráfego, por obter melhor correlação com dados de campo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADVANCED ASPHALT TECHNOLOGIES, LLC (2011) **A manual for design of hot mix asphalt with commentary**, NCHRP Report 673, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C.

ALI, Y. IRFAN, M.; AHMED, S.; KHANZADA, S.; MAHMOOD, T. Investigation of factors affecting dynamic modulus and phase angle of various asphalt concrete mixtures. **Materials and Structures**, v. 49, p. 857–868, 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO MP 8-02**: Stone Matrix Asphalt (SMA). Estados Unidos, 2001.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 166**: Bulk specific gravity of compacted asphalt mixtures using saturated surface-dry specimens. Estados Unidos, 2015.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 62**: Determining modulus of hot mix asphalt (HMA). Estados Unidos, 2009.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 283**: Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage. Anexo de normas traduzidas – Rede Temática de Ligante asfáltico – PETROBRÁS, 1989.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 305**: Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures. Estados Unidos, 1997

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1252**: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading) (Withdrawn 2015). Estados Unidos, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2041**: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. Estados Unidos, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2872**: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). Estados Unidos, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4123**: Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures (Withdrawn 2003). Estados Unidos, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4791**: Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. Estados Unidos, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5821**: Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. Estados Unidos, 2013.

ANDRADE JÚNIOR, Tarcisio Eloi. **Produção de Alumina Biomórfica a partir do sisal e de outros materiais lignocelulósicos**. 2006. 114f. Trabalho de conclusão de curso (Tese) – Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

AQUINO, Regina Coeli Martins Paes. **Desenvolvimento de compósitos de fibras de piaçava da espécie attalea funifera mart e matriz de resina poliéster**. 2003. 151 f. Trabalho de conclusão de curso (Tese) – Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, Rio de Janeiro, 2003.

ARAO, Mieka. **Análise da Vida de Fadiga de Pavimentos Flexíveis em Diferentes Misturas**. 2014. 61 f. Trabalho de conclusão de curso (Monografia) - Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

ASOCIACIÓN MERCOSUR NORMALIZACIÓN. **NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184**: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16018**: Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água, 2001.

Babadopulos, L. F. A. L.; Soares, J. B.; Branco, V. T. F. C. **Interpreting fatigue tests in hot mix asphalt (HMA) using concepts from viscoelasticity and damage mechanics**. In: ANPET. 28., 2014. Curitiba. Anais... Curitiba, 2014.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558p.

BARBOSA, F. R. A.; CARVALHO, C. A.; NOBREGA, J. C.; RODRIGUES, J. B. S.; RODRIGUES, N. P. A. O aproveitamento da casca de banana na merenda escolar: o caso de escolas e creches no município de Pitimbu-PB. **Revista Brasileira de Informações Científicas**. v. 5, n. 4, p. 33-40, out/dez, 2014.

BARRETO JÚNIOR, L. Q.; MORAES, L. A. B.; SERRA, A. S.; FÉLIX, R. S. Avaliação do comportamento do ligante asfalto-borracha e de fibras naturais em misturas asfálticas descontínuas. **Seminário estudantil de produção acadêmica**, v. 10, n.1, p. 1-9, 2006.

BELIGNI, M; VILLIBOR, D. F.; CINCERRE, J. R. (2000). **Mistura Asfáltica do Tipo SMA (Stone Matrix Asphalt): Solução para revestimentos de pavimentos de rodovias e vias urbanas**. In REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 32., 2000. Anais... Brasília, 2000.

BENTO, Priscila Fiochi. **Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos**. 2006. 115f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

BERNAL, C.; BOLDARINI, C.; BREVIGLIERI, S. T. CAVALHEIRO, E. T. G. **Influência de alguns parâmetros experimentais nos resultados de análises calorimétricas diferenciais – DSC**. Química Nova. São Paulo, v. 25, n. 5, p. 849-855, jan. 2002.

BERNARDI, Stefania Tesi. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícia reforçadas com fibra de aramida kevlar**. 2003. 164f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 3ªed. Rio de Janeiro: Petrobras – Asfalto/ABEDA, 2008. 475p.

BEZERRA NETO, Rogério Silveira. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)**. 2004. 169f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

Bindu C. S. **Influence of additives on the characteristics of Stone Matrix Asphalt**. 2012. 221 f. Trabalho de conclusão de curso (Tese) – Curso de Doutorado em Filosofia, Cochin University of Science and Technology, Kerala, 2012.

Bindu C. S.; Beena K. S. Influence of natural fibres on the compressive strength of Stone Matrix Asphalt mixtures. **International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)**. Tamil Nadu, v.1, p. 445-449, 2015.

BLAZEJOWSKI, K. **Stone Matrix Asphalt: Theory and Practice**. 2ªed. Estados Unidos: CRC Press/ Taylor & Francis Group, 2010. 295p.

BONAQUIST, R. (2012) **Evaluation of Flow number (FN) as a discriminating HMA mixture property. Wisconsin Highway Research Program.** Projeto Número 0092-09-01.

BORGES, A. L.; SOUZA, L. S. Exigências Edafoclimáticas. In: **O cultivo da bananeira.** Cruz das Almas: Embrapa mandioca e fruticultura, 2004. p. 15-23.

BRANDÃO, Amanda Torres. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos de polipropileno reforçados com fibras do bagaço de cana-de-açúcar.** 2015,54f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Materiais. Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA), Volta Redonda, 2015.

BROWN, E. R. **Evaluation of laboratory properties of SMA mixtures.** NCAT Report 93-05. Alabama, 1993.

BUTTON, J. W.; PERDOMO, D.; LYTTON, R. L. Influence of aggregate on rutting in asphalt concrete pavements. **Transportation Research Record**, n.1259, p. 141-152, 1990.

CARVALHO, T. M. P.; CARVALHO, L.F.M.; OLIVEIRA, R. R.; SOUSA, F. M. S.; SOUSA, R. C.; MARQUES, J. R. **Avaliação do efeito de tratamento químico às fibras da palha de carnaúba.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS. 22., 2016.Natal. Anais...Natal, 2016.

CASAGRANDE, Michéle Dal Toé. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais.** 2001. 94f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CEPA (Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola). **Síntese anual da agricultura de Santa Catarina.** Florianópolis: Epagri/Cepa, 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2016: relatório gerencial.** Brasília, 2015.

CORDEIRO, N.; BELGACEM, M.N.; TORRES, I.C.; MOURA, J.C.V.P. Chemical composition and pulping of banana pseudo-stems. **Industrial crops and products**, v. 19, p. 147–154, 2004.

CUNHA, Marcos Bottene. **Avaliação do método Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas**. 2004. 105f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

DANTAS NETO, S. A.; FARIAS, M. M.; PAIS, J. C. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas de graduação descontínua (Gap Graded)**. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA. 13., 2006, Maceió. Anais... Maceió, 2006.

DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, E. T. G. **Princípios e Aplicações de Análise Térmica**. São Carlos: IQSC, 2012, 40p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT 095**: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT 148**: Material betuminoso – determinação dos pontos de fulgor e combustão (vaso aberto Cleveland). Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT ME 131**: Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT ME 054**: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT ME 078**: agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT ME 155**: Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT - ME 043**: Misturas betuminosas a quente: Ensaio Marshall: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT - ME 083**: Agregados: Análise granulométrica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT - ME 383**: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT- ME 163**: Material betuminoso – determinação da ductilidade. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT- ME 035**: Agregados: Determinação da abrasão “Los Angeles”: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT- ME 136**: Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT- PRO 199**: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT- PRO 195**: Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997.

DIKSHITH, Ravada Surendra. **Laboratory investigation on Stone Matrix Asphalt using banana fiber**. Trabalho de conclusão de curso (Monografia) – Bacharelado em Tecnologia da Engenharia Civil, National Institute of Technology, Rourkela, 2012.

EAPA (European Asphalt Pavement Association). **Heavy duty surfaces: the arguments for SMA**. Bruxelas, Bélgica, 1998.

EL BANNA, W. R.; FUJIYAMA, R. T.; SANTOS, I. P.; PEREIRA, L. C. O. **Fibras de bananeira como material de engenharia**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA. 39., 2011. Blumenau. Anais... Blumenau, 2011.

EL-HAGE, Robert Becerra. **Estudo de misturas asfálticas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA à luz dos compactadores Marshall e Superpave**. 2012. 138f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Ciências, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

FAO (The State of Food and Agriculture). **Food system for better nutrition**. 2013. <www.fao.org/publications/sofa/en/>. Data de acesso: 15 mar. 2016.

FIGUEIREDO SEGUNDO, M. N. **Uso da fibra da renda de bananeira em misturas asfálticas tipo SMA**. Trabalho de conclusão de curso (TCC) – Bacharel em Engenharia Civil. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

FONSECA, Pedro Miguel Lopes. **Propriedades volumétricas de misturas betuminosas (com e sem fibras)**. 2011. 76f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia/ Universidade do Porto, Porto, 2011.

GARAVELLO, M.E.P.E. coord. **A palha e o fio da bananeira**. Manual de produção. ESALQ/USP, 1999.

GARDETE, D. C.; SANTOS, L. P.; CAPITÃO, S. **Formulação volumétrica de misturas betuminosas tradicionais portuguesas: análise de procedimentos implementados noutros**

países. In: CONGRESSO IBERO-LATINO AMERICANO DEL ASFALTO. 17., 2009. Guatemala. Anais... Guatemala, 2009.

GONÇALVES FILHO, Luiz Carlos. **Utilização do pseudocaule de bananeira como substrato da fermentação alcoólica: avaliação de diferentes processos de despolimerização.** 2011. 84f. ++Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia de Processos, Universidade da Região de Joinville (Univille), Joinville, 2011.

GONÇALVES, A.P. B.; GUIMARÃES, D. H.; MIRANDA, C. S. OLIVEIRA. J. C.; CRUZ, A. M. F.; LUPORINI, S.; JOSÉ, N. M. **Caracterização físico-química de fibra de bananeira roxa.** IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS. 21., 2014. Cuiabá. Anais... Cuiabá, 2014.

GUIMARÃES, Bárbara Maria Ribeiro. **Tratamento químico de partículas de pseudocaule da bananeira visando à produção de painéis aglomerados.** 2012. 93f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

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

HAGOS, E.T. **The Effect of Aging on Binder Properties of Porous Asphalt Concrete.** 2008. 343 f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia de Estradas e Transportes, Faculty of Civil Engineering and Geo-Sciences at the Delft University of Technology, Etiópia, 2008.

HERMANS, P. H.; WEIDINGER, A. X-Ray Studies on the Crystallinity of Cellulose. **Journal of Polymer Science**. v.4, p. 135-144, 1949.

Hu, X. & Hsieh, Y. - J. Polym. Sci.: Part B: **Polymer Physics**, v. 34, p.1451, 1996.

JAHROMI, S. G.; KHODAILI, Ali. Carbon Fiber Reinforced Asphalt Concrete. **The Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 33, n. 2B, 355-364. 2008.

JOHN, Vanderley M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113 f. Trabalho de conclusão de curso (Tese) – Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo PCC USP, São Paulo, 2000.

JÚSTIZ-SMITH, N.G.; VIRGO, G.J. BUCHANAN, V.E. Potential of Jamaican Banana, Coconut Coir and Bagasse Fibres as Composite Materials. **Materials Characterization**, v. 59, p 1273-1278, 2008.

KAJIYA, E. A. M. et al. Evaluation of the veracity of one work by the artist Di Cavalcanti through non-destructive techniques: XRF, imaging and brush stroke analysis. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 95, p. 373-377, 2014.

KAMAL, M. A.; YASIN, B. SHAZIB, F. Resilient behaviour of asphalt concrete under repeated loading & effects of temperature. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v. 6, p. 1329 - 1343, 2005.

KLENZENDORF, J. B., CHARBENEAU, R., ECK, B. e BARRETT, M. Measurement and Modeling of Hydraulic Characteristics of Permeable Friction Course (PFC). **American Society of Civil Engineers**, p.1-11, 2011.

KUMAR, P.; SIKDAR, P. K.; BOSE, S.; CHANDRA, S. Use of Jute Fibre in Stone Matrix Asphalt. **Road Materials and Pavement Design**, v.5, n.2, p. 239-249, 2011.

LAVASANI, M.; NAMIN, M. L.; FARTASH, H. Experimental investigation on mineral and organic fibers effect on resilient modulus and dynamic creep of stone matrix asphalt and continuous graded mixtures in three temperature levels. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 232-242, 2015.

LEAL, Cláudio Luiz Dias. **Aproveitamento do bagaço de cana de açúcar em misturas asfálticas**. 2013. 219f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tese) – Tecnologia da Construção, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

LENGOWSKI, Elaine Cristina. **Caracterização e predição da cristalinidade de celulose através de espectroscopia no infravermelho e análise multivariada**. 2012, 108f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

LIU, H.; WU, Q. ZHANG, Q. Preparation and properties of banana fiber-reinforced composites based on high density polyethylene (HDPE)/Nylon-6 blends. **Bioresource Technology**, v.100, p. 6088–6097, 2009.

MAGALHÃES, Sidlei Teixeira. **Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho**. 2004. 188f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MARQUES, **Geraldo Luciano de Oliveira**. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória**. 2004. 461f. Trabalho de conclusão de curso (Tese) – Doutorado em Ciências em Engenharia Civil. Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MARTIN, A. R.; MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H. C. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade agave sisalana. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 1, p. 40-46, 2009.

MARTINHO, F.; LANCHAS, S.; NUNEZ, R.; BATISTA, F.; MIRANDA, H. **Experiência portuguesa em misturas betuminosas do tipo SMA com fibras celulósicas**. In: CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS.7., 2013, Lisboa. Anais...Lisboa, 2013.

MARTINS, M. A.; MORELLI, C. L.; MARINELLI, A. L.; MARCONCINI, J. M.; BRETAS, R. E. S. **Caracterização das fibras amazônicas de pupunha, babaçu e balsa através de**

DRX, TG e RMN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 11., 2011. Campos do Jordão. Anais... Campos do Jordão, 2011.

MILANESE, Andressa Cecília. **Caracterização de compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibras de sisal e de vidro.** 2008. 130f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2008.

MOTTA, L. M. G. & LEITE, L. F. M. **Efeito do Fíler nas Características Mecânicas das Misturas Asfálticas.** In: CONGRESSO PAN-AMERICANO DE ENGENHARIA DE TRÂNSITO E TRANSPORTE, 11., 2000. Gramado. Anais... Gramado, 2000.

MOTTA, L. M. G., MEDINA, J., CRUZ, A. M. **Aspectos do Comportamento das Misturas Asfálticas.** In: CURSO RESILIÊNCIA E FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS.1993. Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 1993.

MOURÃO, Fabrício Augusto Lago. **Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA.** 2003. 131f. Trabalho de Conclusão de Curso (Dissertação) – Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

NAPA – NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (2002). Designing and Constructing SMA Mixtures – State of Practice. Quality Improvement Series 122. Lanham, MD, EUA.

NASCIMENTO FILHO, Virgílio. F. **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios x por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF).** Departamento de Ciências Exatas/ESALQ,1999.

NCHRP (National Cooperative Highway Research Program). **Fiber additives in asphalt mixture.** Washington, 2015.

NEVES FILHO, Cláudio Luiz Dubeux. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas sma produzidas com ligante asfalto-borracha.** 2004. 80 f. Trabalho de conclusão de curso

(Dissertação) – Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

ODA, S.; FERNANDES JÚNIOR, J.L.; ILDEFONSO, J. S. Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 26, p. 13-20, 2012.

OLIVEIRA FILHO, Clonilo Moreira Sindeaux de. **Estudo do efeito de diferentes granulometrias no comportamento mecânico de misturas asfálticas densas descontínuas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA)**. 2007. 122 f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

OLIVEIRA, H. N.; MULINARI, D. R. Avaliação do uso de agente compatibilizante em compósitos poliméricos. **Cadernos UniFOA**, p. 29-35, 2014.

OLIVEIRA, L.; CORDEIRO, N. EVTUGUIN, D.V.; TORRES, I. C.; SILVESTRE, A. J. D. Chemical composition of different morphological parts from ‘Dwarf Cavendish’ banana plant and their potential as a non-wood renewable source of natural products. **Industrial Crops and Products**, v. 26, p. 163–172, 2007.

PEREIRA, A. L. S.; CORDEIRO, E. M. S.; NASCIMENTO, D. M.; MORAIS, J. P. S.; SOUSA, M. S. M.; ROSA, M. F. **Extração e caracterização de nanocelulose de fibras do pseudocaule da bananeira**. In: CONGRESSO NORTE-NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO. 5., 2011. Maceió. Anais...Maceió, 2011.

PEREIRA, P. H. F.; VOORWALD, H. C. J.; CIOFFI, M. O. H.; PEREIRA, M. L. C. P. S. Preparação e Caracterização de Materiais Híbridos Celulose/ $\text{NbOPO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ a partir de Celulose Branqueada de Bagaço de Cana-de-Açúcar. **Polímeros**, v. 22, n. 1, p. 88-95, 2012.

PICCOLI, R., et al. **Características das principais técnicas analíticas aplicadas à avanços em caracterização de amostras sólidas cristalinas através de Difractometria de Raios-X**. In:

CBECIMAT – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS. 17., 2006. Foz do Iguaçu. Anais...Foz do Iguaçu, 2006.

Produção de bananas. Rio de Janeiro: IBGE, 2014. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Data de acesso: 10 jun. 2016.

RAMOS, Kleberon de Oliveira. **Estudo sobre mistura asfáltica tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) para pavimento aeroportuário**. 2012. 196f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

REIS, R. M. M. de; BERNUCCI, L. B.; RODRIGUEZ, P. D.; SHIROMA, S.; ZANON, A. L. **Revestimento asfáltico tipo SMA para alto desempenho em vias de tráfego pesado**. Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2002.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D. KENNEDY, T. W. **Hot mix asphalt materials, mixture, design and construction**. 2ªed. Lanham, Maryland: 1996. 585p.

RODRIGUES, Flávia C. Souto M. **Degradação fotocatalítica do antraceno empregando Ag-TiO₂ suportado em fibras de coco e sisal**. 2014. 146f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

ROJA, M. L. B.; NEVES, J. M. **Caracterização de fibras de bananeira “nanição” (musa grupo AAA, “Giant Cavendish”) como possível matéria-prima para a produção de pasta celulósica para a fabricação de papel**. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN EM CELULOSA Y PAPEL. 2., 2002, Campinas. Anais...Campinas, 2002.

SANTOS, Caio Rubens Gonçalves. **Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas**. 2005. 109f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SCALICE, Régis Kovacs. **Manual do Engenheiro Chefe: Projeto de Equipamentos Modulares para o Processamento de Fibra de Bananeira**. Joinville: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2009, 9p.

SEBRAE (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas). **Estudo de Mercado do SEBRAE/ESPM: Banana, relatório completo**. 2008.

SEGAL, L.; CREELY, J. J.; MARTIN, A. E.; CONRAD, C. M. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. **Textile Research Journal**, Princeton, v. 29, n. 10, p. 786-794, 1959.

SILVA, A. L.; COSTA JÚNIOR, A. E.; NASCIMENTO, D. M.; ROSA, M. F.; FECHINE, P. B. A.; MAZETTO, S. E. **Efeito do tratamento alcalino e branqueamento da morfologia e no índice de cristalinidade da fibra de bucha vegetal (Luffa cylindrica)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 53., 2013. Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 2013.

SILVA, L. J. **Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos laminados com fibras vegetais**. 2011. 154f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João del-Rei, São João Del Rei, 2011.

SILVA, Maurício Batista da. **Caracterização de misturas de alto desempenho tipo SMA e avaliação do processo executivo em pista experimental no estado do Rio Grande do Sul**. 2012. 88f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SOFFNER, Maria de Lourdes Aparecida Prudente. **Produção de polpa celulósica a partir de engaço de bananeira**. 2001. 70 f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

SOREN, Rajendra. **Laboratory investigation of Stone Matrix Asphalt using bagasse fiber**. 2012. 71f. Trabalho de conclusão de curso (Monografia) – Bacharelado em Tecnologia da Engenharia Civil, National Institute of Technology, Rourkela, 2012.

SOUZA, Marcus Vinicius Ribeiro e. **Efeito de fibras sintéticas nas propriedades de ligantes e concretos asfálticos**. 2010. 150f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

TAVARES, Diogo Santos. **Avaliação laboratorial de mistura asfáltica do tipo SMA com agregado siderúrgico**. 2012. 138f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia Civil, COPPE, Rio de Janeiro, 2012.

TEIXEIRA, E. M.; OLIVEIRA, C. R. MATTOSO, L. H. C.; CORRÊA, A. C.; Paladin, P. D. Nanofibras de Algodão Obtidas sob Diferentes Condições de Hidrólise Ácida. **Polímeros**, V. 20, n. 4, p. 264-268, 2010.

VALE, A. C.; CASAGRANDE M. D. T.; SOARES, J. B. Behavior of Natural Fiber in Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Two Design Methods. **J. Mater. Civ. Eng**, v. 26(3), p. 457-465, 2014.

VALE, A. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; SOARES, J. B. Behavior of natural fiber in Stone Matrix Asphalt mixture using two design methods. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, p. 457-465, 2014.

VALE, Aline Colares do. **Estudo laboratorial da viabilidade do uso de fibras de coco em misturas asfálticas do tipo SMA**. 2007. 147 f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Curso de Mestrado em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

VALENÇA, Patricia de Magalhães Aragão. **Desempenho mecânico de misturas asfálticas do tipo Stone Matrix Asphalt com uso de fibras amazônicas e agregados de resíduos de construção e demolição**. 2012. 114f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia de Recursos da Amazônia. **Universidade Federal do Amazonas**, Manaus, 2012.

VIEIRA, L. M. **Brasil é o terceiro maior produtor de banana. Revista Campo e Negócio.** 2015. < <http://www.revistacampoenegocios.com.br/brasil-e-o-terceiro-maior-produtor-de-banana/>>. Data de acesso: 12 mar. 2016.

WOODSIDE, A. R.; WOODWARD, W. D. H.; AKBULUT, H. STONE mastic asphalt: assessing the effect of cellulose fibre additives. **Proc. Instn Civ. Engrs Mun. Engr**, v. 127, p. 103-108, Sept, 1998.