



**UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DO  
MARANHÃO**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE EXPRESSÕES GRÁFICAS E TRANSPORTES**

**LETÍCIA SOUSA DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DO EFEITO DO EQUIVALENTE DE AREIA FORA DOS  
REQUISITOS DE NORMA NAS MISTURAS DE AREIA ASFALTO A QUENTE**

**SÃO LUIS – MA  
2016**

**LETÍCIA SOUSA DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DO EFEITO DO EQUIVALENTE DE AREIA FORA DOS  
REQUISITOS DE NORMA NAS MISTURAS DE AREIA ASFALTO A QUENTE**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana.

SÃO LUIS – MA  
2016

Oliveira, Letícia Sousa de.

Estudo do efeito do equivalente de areia fora dos requisitos de norma nas misturas de areia asfalto a quente / Letícia Sousa de Oliveira. – São Luís, 2016.

113 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana.

1. Revestimento asfáltico. 2. Areia asfalto a quente. 3. Equivalente de areia. I.  
Título.

CDU 625.859.4

LETÍCIA SOUSA DE OLIVEIRA

**ESTUDO DO EFEITO DO EQUIVALENTE DE AREIA FORA DOS  
REQUISITOS DE NORMA NAS MISTURAS DE AREIA ASFALTO A QUENTE**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão como requisito à obtenção de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 12, 12, 2016

**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof. Dr. Walter Canales Sara'Ans (Orientador)  
Doutor em Engenharia de Transportes  
Universidade Estadual do Maranhão



---

Prof. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho (1º Examinador)  
Doutora em Urbanismo  
Universidade Estadual do Maranhão



---

Prof. Msc. Marivaldo Costa Duarte (2º Examinador)  
Mestre em Planejamento Estratégico  
Universidade Estadual do Maranhão

A Deus todo poderoso e a minha família  
pelo incentivo, força e compreensão  
pelos momentos de ausência.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me ter concedido, através de sua bondade infinita, o potencial de concretizar mais uma conquista. A Ele toda honra e glória.

Ao meu professor e orientador deste trabalho, Walter Canales Sant'Ana, que com sua grande sabedoria, motivação e apoio me apresentou ao mundo da pavimentação. Com sua paciência me ajudou e me orientou ao longo desta caminhada.

A minha amada e querida mãe, Maria Nilde, e ao meu namorado, Osmar Coelho, que sentiram de perto minhas preocupações, que com apoio em todos os momentos, me deram o combustível maior para nunca desistir, o amor incondicional. Sem palavras para expressar tudo que vocês significam na minha vida, dedico a vocês a minha conquista.

Aos professores e funcionários do Curso de Engenharia Civil, pela amizade, apoio e orientação ao longo de minha graduação.

Aos meus amigos, parceiros de uma vida, pelo apoio, amizade e companheirismo em todas as horas. E em especial aqueles que estiveram comigo durante o curso, Amanda Sousa, Márcia Gabriele e Adriana de Sá, que acompanharam os momentos de alegrias e tristezas nestes 5 anos.

A CNPq pelo apoio financeiro através de bolsa de estudos em parte do período deste trabalho.

Aos laboratórios de Entomologia do Curso de Agronomia e o de Solos da Agroecologia da Universidade Estadual do Maranhão e ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará, por terem aberto as portas para a realização de ensaios que foram fundamentais para o desenvolvimento do presente trabalho.

Estendo meus agradecimentos a todos que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Ó profundidade da riqueza da sabedoria e do conhecimento de Deus! Quão insondáveis são os seus juízos e inescrutáveis os seus caminhos! ‘Quem conheceu a mente do Senhor? Ou quem foi seu conselheiro?’ ‘Quem primeiro lhe deu, para que ele o recompense?’ Pois Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas. A Ele seja a glória para sempre! Amém.”

Romanos 11:33-36

## RESUMO

Um pavimento tem por objetivo propiciar um tráfego confortável e seguro aos usuários, com capacidade de suportar técnica e economicamente os esforços oriundos da ação do tráfego combinados com o desgaste decorrente dos anos de serviços. A mistura asfáltica de areia asfalto usinada a quente (AAUQ) é muito utilizada como revestimento de pavimento no estado do Maranhão. O projeto desta mistura asfáltica exige requisitos impostos pelas normas vigentes para os materiais utilizados (areia, pó de pedra, asfalto, fíler). Entre esses requisitos, destaca-se a busca de resultados adequados no ensaio de Equivalente de Areia. No caso das areias utilizadas no estado do Maranhão especificamente, o ensaio de equivalente de areia apresenta resultados na maioria das vezes fora dos requisitos de norma, principalmente para as areias "de barranco". Porém, na prática rodoviária local, utilizam-se areias fora de norma no que se refere a este ensaio, sem a comprovação de que ocorram patologias relacionadas a tal condição. A partir da coleta local de uma areia dentro de norma e outra fora de norma em relação ao ensaio de Equivalente de Areia, este trabalho buscou por meio de ensaios mecânicos na mistura AAUQ comprovar sua ineficiência quando utilizada areia fora de norma e observar se o ensaio de Equivalente de Areia tem influência no comportamento mecânico das misturas de AAUQ.

**PALAVRAS-CHAVE:** Revestimento Asfáltico. Areia Asfalto a Quente. Equivalente de Areia.

## **ABSTRACT**

Road pavement has the purpose to provide safe and comfortable traffic to users, with the capacity to endure technically and economically all the stress originated by traffic and wear and tear from years of service. The asphaltic mix of Hot Mix Asphalt Concrete (HMAC) is very commonly utilized as pavement coating in the state of Maranhão. This mixture's project requires a number of rules imposed by the technical norms valid for each utilized material (sand, grit, asphalt, filler). Amongst all requirements, the pursuit of adequate results to the Equivalent Sand Test stands out from the others. Specifically to the sands used in the state of Maranhão, the Equivalent Sand Test presents results commonly outside of the norms' requirements, especially for "hillside" sands. However, in the local paving practices, out of norm sands, in relation to this test, are typically used in pavement mixes, without any evidence that its usage causes pathologies. From the local collection of a within the norm sand and an out of norm sand relative to the Equivalent Sand Test, this project has searched, through mechanical HMAC mixes tests, to prove its inefficiency when prepared with out of norm sand to observe if the Equivalent Sand Test actually influences or not the mechanical behavior of the HMAC.

**KEYWORDS:** Asphaltic Coating. Sand Asphalt Hot Mix. Equivalent Sand.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comparação entre os tipos de estrutura do pavimento .....	25
Figura 2 - Esquema de proveta com os materiais depositados para a leitura final .....	34
Figura 3 - Aparelho de Casagrande .....	35
Figura 4 - Placa de vidro com o rolinho cilíndrico .....	36
Figura 5 - Aparelho utilizado no ensaio de angularidade de agregados finos.....	38
Figura 6 - Ensaio de Viscosidade de Saybolt-Furol .....	41
Figura 7 - Prensa Marshall .....	43
Figura 8 - Corpo de prova em suspensão na água .....	44
Figura 9 - Equipamento utilizado para ensaio de RTCD .....	45
Figura 10 - Equipamento de Abrasão Los Angeles .....	46
Figura 11 - Corpo de prova ajustado no equipamento para ensaio de Módulo de Resiliência .....	48
Figura 12 - Configuração do ensaio de fadiga à compressão diametral .....	51
Figura 13 - Fluxograma de dimensionamento mecânico .....	54
Figura 14 - Fluxograma do método integrado de análise e dimensionamento de pavimentos asfálticos (SisPav) .....	55
Figura 15 - Areia B .....	56
Figura 16 - Local da coleta da areia B .....	57
Figura 17- Areia A .....	57
Figura 18 - CAP 50/70 .....	58
Figura 19 - Localização da SEMOSP .....	58
Figura 20 - Realização do ensaio de equivalente de areia na areia A.....	60
Figura 21 - Amostra da areia A utilizada para a realização da granulometria sem lavagem .....	61
Figura 22 - Amostra da areia A utilizada para a realização da granulometria lavada ....	62
Figura 23 - Realização dos ensaios de índice de consistência na Areia A.....	63
Figura 24 - Realização do ensaio de equivalente de areia na areia B .....	65
Figura 25 - Amostra da areia B utilizada para a realização da granulometria sem lavagem .....	67
Figura 26 - Amostra da areia B utilizada para a realização da granulometria lavada ....	67
Figura 27- Realização dos ensaios de índice de consistência na Areia B .....	68
Figura 28 - Ensaio de penetração.....	70

Figura 29 - Ensaio de ponto de amolecimento .....	70
Figura 30 - Corpos de prova das misturas asfálticas A e B partidos ao meio .....	75
Figura 31 - Interior dos corpos de prova das misturas asfálticas A e B.....	76
Figura 32 - CPs das misturas A e B após a realização do ensaio de Cântabro.....	78
Figura 33 - Equipamento utilizado para a realização do ensaio de MR .....	79
Figura 34 - Realização do ensaio de MR .....	80
Figura 35 - Controle da temperatura durante a realização do ensaio de MR .....	80
Figura 36 - Etapas da execução do ensaio Lottman: (a) aplicação de vácuo; (b) embalagem para condicionamento em freezer; (c) CP após a retirada do freezer; (d) banho-maria a 60°C; (e) banho-maria a 25°C; (f) rompimento .....	87
Figura 37 - Estrutura dimensionada para a mistura asfáltica com areia A.....	89
Figura 38 - Estrutura dimensionada para a mistura asfáltica com areia B .....	90

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica da areia A .....	61
Gráfico 2 - Curva granulométrica da areia B .....	66
Gráfico 3 - Gráfico da Viscosidade Saybol-Furol .....	71
Gráfico 4 - Enquadramento da areia A na faixa C do DERT-ES-P 14/00.....	72
Gráfico 5 - Enquadramento da areia B na faixa C do DERT-ES-P 14/00.....	73
Gráfico 6 - Teor de CAP versus Vv e RBV .....	76
Gráfico 7 – Aplicação de carga repetida no ensaio de MR.....	81
Gráfico 8 - Deslocamentos horizontais que ocorrem no ensaio de MR .....	82
Gráfico 9 - Curvas da vida de fadiga em função da diferença de tensão .....	84
Gráfico 10 - Curvas de vida de fadiga em função da deformação resiliente das misturas .....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixas granulométricas e características de dosagem recomendadas pelo DNIT para AAUQ (DNIT 032/2005-ES).....	30
Tabela 2 - Faixas granulométricas e características de dosagem recomendadas pela norma DERT – ES – P 14/00 para AAUQ.....	31
Tabela 3 - Dimensões nominais das peneiras.....	33
Tabela 4 – Frações granulométricas utilizadas nos métodos A e B .....	39
Tabela 5 - Especificação Superpave de valores mínimos para FAA.....	39
Tabela 6 - Critérios para indicação de resultados.....	40
Tabela 7 - Ensaio Marshall - valores limites para misturas convencionais .....	43
Tabela 8 - Determinação do equivalente de areia da areia A.....	60
Tabela 9 - Valores do ensaio de teor de matéria orgânica da areia A.....	63
Tabela 10 - Valores do ensaio de FAA da areia A .....	64
Tabela 11 - Determinação do equivalente de areia da areia B .....	65
Tabela 12 - Valores do ensaio de teor de matéria orgânica da areia B .....	68
Tabela 13 - Valores do ensaio de FAA da areia B .....	69
Tabela 14 - Temperaturas da mistura, do CAP e do agregado.....	71
Tabela 15 - Densidade do agregado miúdo .....	73
Tabela 16 - Variação dos parâmetros de norma em função do CAP para a mistura com a areia A .....	74
Tabela 17 - Variação dos parâmetros de norma em função do CAP para a mistura com a areia B .....	74
Tabela 18 - Propriedades das misturas de AAUQ.....	77
Tabela 19 - Resistência a Tração por Compressão Diametral.....	78
Tabela 20 - Resultado dos ensaios de módulo de resiliência .....	82
Tabela 21 - Resultados do ensaio de vida de fadiga por compressão diametral .....	84
Tabela 22 - Deformação resiliente das misturas asfálticas .....	85
Tabela 23 - Modelos de fadiga .....	86
Tabela 24 - Resultados do ensaio de adesividade ligante-agregado (Lottman) .....	87
Tabela 25 - Camadas utilizadas na análise computacional da areia A .....	89
Tabela 26 - Camadas utilizadas na análise computacional da areia B.....	90
Tabela 27 - Vida de projeto e dano crítico causado ao pavimento.....	90

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIÇÕES

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation

AAUQ – Areia Asfalto Usinado a Quente

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

CA – Concreto Asfáltico Denso

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CAUQ – Concreto Asfáltico Usinado a Quente

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CNT – Confederação Nacional de Transporte

CP – Corpo de prova

CPA – Camada Porosa de Atrito ou Revestimento Asfáltico Drenante

Dap – Densidade Aparente

DER – Departamento de Estrada e Rodagem

DETR – Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes

DMT – Densidade Máxima Teórica

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

Dr – Densidade real dos grãos de agregados miúdos

EA – Equivalente de Areia

ELSYM5 – Elastic Layered System Model 5

ES – Especificação de Serviço

FAA – Fine Aggregate Angularity

FN – Flow Number

HMAC – Hot Mix Asphalt Concrete

IP – Índice de Plasticidade

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

LUBNOR – Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste

LVDT – Linear Variable Differential Transformer

MA – Maranhão

ME – Método de Ensaio

MO – Teor de Matéria Orgânica

MR – Módulo de Resiliência  
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora  
NL – Não apresenta Limite de Liquidez  
NP – Não Plástico  
NTL – Normas del Laboratorio del Transporte  
P – Pavimentação  
RBV – Relação Betume-vazios  
RPBC – Refinaria Presidente Bernardes em Cubatão  
RT – Resistência a Tração  
RTCD – Resistência à Tração por Compressão Diametral  
SEMOSP – Secretária Municipal de Obras e Serviços Públicos de São Luís  
SINFRA – Secretária de Infraestrutura  
SMA – Stone Matrix Asphalt  
TC – Tensão Controlada  
UEMA – Universidade Estadual do Maranhão  
UFC – Universidade Federal do Ceará  
VAM – Vazios de Agregado Mineral  
VCB – Vazios Cheios de Betume  
Vv – Volume de vazios

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1	OBJETIVOS .....	19
1.1.1	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>19</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>19</b>
1.2	JUSTIFICATIVA.....	19
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	20
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>22</b>
2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	22
2.1.1	<b>Breve histórico da pavimentação no Brasil .....</b>	<b>22</b>
2.1.2	<b>Introdução à Pavimentação .....</b>	<b>23</b>
2.1.2.1	Funções do Pavimento .....	23
2.1.2.2	Camadas do Pavimento.....	24
2.1.2.3	Tipos de Pavimentos.....	25
2.1.2.3.1	<i>Pavimento Rígido .....</i>	<i>25</i>
2.1.2.3.2	<i>Pavimento Semirrígido .....</i>	<i>26</i>
2.1.2.3.3	<i>Pavimento Flexível .....</i>	<i>26</i>
2.1.3	<b>Revestimentos Flexíveis .....</b>	<b>27</b>
2.1.3.1	Concreto Asfáltico Denso (CA) ou Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ).....	27
2.1.3.2	Camada Porosa de Atrito (CPA) .....	28
2.1.3.3	Stone Matrix Asphalt (SMA) .....	29
2.1.3.4	Gap graded .....	29
2.1.3.5	Areia Asfalto Usinado a Quente (AAUQ) .....	30
2.1.4	<b>Ensaio.....</b>	<b>32</b>
2.1.4.1	Agregados miúdos .....	32
2.1.4.1.1	<i>Granulometria.....</i>	<i>32</i>

2.1.4.1.2	<i>Equivalente Areia</i> .....	33
2.1.4.1.3	<i>Limites de Consistência</i> .....	34
2.1.4.1.4	<i>Densidade Real</i> .....	36
2.1.4.1.5	<i>Teor de matéria orgânica</i> .....	37
2.1.4.1.6	<i>Angularidade</i> .....	38
2.1.4.2	<b>CAP</b> .....	39
2.1.4.2.1	<i>Penetração</i> .....	40
2.1.4.2.2	<i>Viscosidade de Saybolt-Furol</i> .....	40
2.1.4.2.3	<i>Ponto de Amolecimento</i> .....	41
2.1.4.3	<b>Propriedades Mecânicas, Volumétricas e de Desgaste da Mistura Asfáltica</b> .....	42
2.1.4.3.1	<i>Dosagem, Estabilidade e Fluência Marshall</i> .....	42
2.1.4.3.2	<i>Densidade Aparente da Mistura</i> .....	44
2.1.4.3.3	<i>Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)</i> .....	44
2.1.4.3.4	<i>Desgaste Cântabro</i> .....	46
2.1.4.3.5	<i>Módulo de Resiliência (MR)</i> .....	47
2.1.4.3.6	<i>Adesividade</i> .....	48
2.1.4.3.7	<i>Fadiga por compressão diametral</i> .....	49
2.1.5	<b>Mecânica dos Pavimentos</b> .....	52
2.1.6	<b>Método Mecânico-Empírico – SisPav</b> .....	54
2.2	<b>COLETA DOS MATERIAIS</b> .....	56
3	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	59
3.1	<b>AREIA A</b> .....	59
3.1.1	<b>Equivalente de Areia</b> .....	59
3.1.2	<b>Granulometria</b> .....	60
3.1.3	<b>Índices de Consistência</b> .....	62
3.1.4	<b>Teor de Matéria Orgânica</b> .....	63
3.1.5	<b>Angularidade do Agregado Fino</b> .....	64

3.2	AREIA B .....	64
3.2.1	Equivalente de Areia.....	64
3.2.2	Granulometria.....	65
3.2.3	Índices de Consistência .....	67
3.2.4	Teor de Matéria Orgânica .....	68
3.2.5	Angularidade do Agregado Fino .....	69
3.3	CAP .....	69
3.3.1	Penetração .....	69
3.3.2	Ponto de Amolecimento .....	70
3.3.3	Viscosidade de Saybolt-Furol .....	71
3.4	MISTURA ASFÁLTICA .....	72
3.4.1	Dosagem e Estabilidade Marshall .....	72
3.4.2	Desgaste Cântabro .....	77
3.4.3	Resistência a Tração por Compressão Diametral.....	78
3.4.4	Módulo de Resiliência .....	79
2.4.5	Vida de Fadiga .....	83
2.4.6	Adesividade (Lottman Modificado).....	86
3	ANÁLISE COMPARATIVA DAS MISTURAS DIMENSIONANDO ATRAVÉS DO MÉTODO MECANÍSTICO UTILIZANDO O PROGRAMA SISPAV .....	88
4	CONCLUSÃO .....	92
	REFERÊNCIAS .....	95
	APÊNDICE A – CURVAS DOS PARÂMETROS DA DOSAGEM MARSHALL PARA AS MISTURAS UTILIZANDO AREIA A .....	100
	APÊNDICE B – CURVAS DOS PARÂMETROS DA DOSAGEM MARSHALL PARA AS MISTURAS UTILIZANDO AREIA B.....	103
	APÊNDICE C – GRÁFICOS DA CARGA APLICADA EM FUNÇÃO DO TEMPO OBTIDOS APARTIR DO ENSAIO DE MÓDULO DE	

RESILIÊNCIA PARA OS CORPOS DE PROVA DE AAUQ UTILIZANDO AREIA A .....	106
APÊNDICE D – GRÁFICOS DA CARGA APLICADA EM FUNÇÃO DO TEMPO OBTIDOS APARTIR DO ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA OS CORPOS DE PROVA DE AAUQ UTILIZANDO AREIA B .....	108
APÊNDICE E – GRÁFICOS DO DESLOCAMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO OBTIDOS APARTIR DO ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA OS CORPOS DE PROVA DE AAUQ UTILIZANDO AREIA A .....	110
APÊNDICE F – GRÁFICOS DO DESLOCAMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO OBTIDOS APARTIR DO ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA OS CORPOS DE PROVA DE AAUQ UTILIZANDO AREIA B .....	112

## 1 INTRODUÇÃO

O modal rodoviário brasileiro é, há muito tempo, a nossa principal forma de transporte, havendo necessidade contínua de uma atenção para esse setor.

Segundo o Relatório Gerencial da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2015), existem, no país, 213.229 km de estradas pavimentadas, correspondendo a 12,4% da malha viária, 1.353.186 km de rodovias não pavimentadas, isto é 78,6% do total e 154.192 km de rodovias planejadas, sendo 9,0%, totalizando 1.720.607 km de rodovias. Das rodovias pavimentadas existem 66.712 km rodovias federais (31,3%), 119.691 km rodovias estaduais (56,1%) e 26.826 km rodovias municipais (12,6%).

O estado do Maranhão possui uma rede rodoviária pavimentada de 6.830 km distribuídos em 3.162 km de estradas federais e 3.667 km de estradas estaduais atendendo a uma frota de 1.405.351 veículos (CNT, 2015). Porém, a rede não pavimentada possui mais de 45.000 km (SANT'ANA, 2009).

Apresentam-se assim, aos seus governantes e ao corpo de engenheiros, grandes desafios técnicos, econômicos e científicos na área de pavimentação rodoviária, no que se refere à manutenção do que já está pavimentado e grande contingente de rodovias a pavimentar, buscando sempre atender as melhores soluções e os melhores preços.

Nas camadas de revestimento, por exemplo, onde o custo é bem superior ao das demais camadas, é sempre importante a pesquisa dos materiais componentes, de modo que sejam mais resistentes, mais duráveis e sustentáveis, como vem se mostrando nos países desenvolvidos.

Sabe-se que a AAUQ (areia asfalto usinada a quente) é um revestimento asfáltico muito utilizado em nosso estado, em rodovias e vias urbanas, se comparado aos demais estados da federação. Isto ocorre pela carência de pedreiras no Maranhão por sua formação geológica e, a viabilidade de usar esta mistura asfáltica em trechos onde o tráfego não é alto. Segundo Sant'Ana (2009), cerca de apenas 48% da malha rodoviária maranhense é pavimentada, destas, 45% são revestidas com AAUQ.

Assim, o estudo das areias utilizadas deve ser aprofundado de maneira a produzir misturas asfálticas mais duráveis e resistentes, garantindo otimização dos recursos públicos aplicados além de conforto e segurança aos usuários.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Estudar os efeitos do resultado do ensaio de equivalente de areia (EA) fora dos requisitos de norma para misturas de areia asfalto a quente moldadas em laboratório.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Introduzir novos ensaios para verificação de parâmetros de agregados miúdos e misturas asfálticas tipo AAUQ à dinâmica do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UEMA;
- b) Distinguir ensaios específicos que demonstre em laboratório o dano causado à mistura de AAUQ que se utilizou de areia fora das especificações para o ensaio de EA;
- c) Difundir os resultados da pesquisa aos engenheiros rodoviários maranhenses;
- d) Realizar uma análise comparativa das misturas através do método mecanístico de dimensionamento de pavimentos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A qualidade dos pavimentos encontra-se sempre em discussão, predominando a percepção de que algo precisa ser feito para que se atinja um padrão mínimo de qualidade. São rodovias e vias urbanas onde predominam as mais diversas patologias e a vida útil do pavimento sempre aquém do esperado.

Onde está a solução deste problema? São os materiais, britas, areias e asfalto? Geralmente este último é apontado pelos leigos como causador de todas as patologias da mistura asfáltica. Ou serão os ensaios que avaliam estes materiais ou misturas asfálticas? Podem ser os projetos de engenharia ou a falta destes, ou mesmo, desconsideração de fatores importantíssimos como a drenagem pluvial. Pode mesmo ser a execução da obra com a falta de rigor de uma fiscalização.

A intenção do trabalho é contribuir com algo relacionado ao nosso estado e a mistura asfáltica de AAUQ muito utilizada nos estados que não tem ocorrência de pedreiras

em abundância, matéria-prima necessária para confecção do CAUQ – concreto asfáltico usinado a quente. A distância de transporte desde uma pedreira até o local da obra pode superar facilmente os 100 km, fazendo com que este custo inviabilize a construção da rodovia ou via urbana, utilizando o CAUQ.

No estado do Maranhão, para a confecção da mistura asfáltica de AAUQ, utiliza-se normalmente areia e ligante asfáltico tipo CAP (cimento asfáltico de petróleo) e, em alguns casos, o pó de pedra. No caso da areia, esta poderá ser de "rio" ou de "barranco". A areia de "rio" ou também areia lavada provém de sistemas de dragagem, resultando num material sem as partículas finas, geralmente nocivas à pavimentação, que foram carreadas pela água. Já, a areia de "barranco" obtida de jazidas em locais sem influência de cursos d'água ou lençol freático, produz um material que, na maioria das vezes, traz uma quantidade de finos solta ou aderida aos agregados mais graúdos.

A proporção destes finos na areia é determinada pelo ensaio de Equivalente de Areia que pode ser definido como a relação entre as colunas de areia e de silte/argila em suspensão numa proveta em solução aquosa de cloreto de cálcio (DNER ME-054/97). Este ensaio tem a finalidade de determinar a presença de material plástico nos finos da areia, que poderá provocar retração e inchamento na mistura asfáltica.

A norma DNIT 032/2005 - ES que regulamenta a execução de misturas de AAUQ determina que o agregado miúdo utilizado (areia) tenha um Equivalente de Areia maior que 55%. Porém, a prática da engenharia rodoviária maranhense tem utilizado areias com percentual inferior ao apontado em norma (25% a 40%), sem a constatação de prejuízos à qualidade do revestimento asfáltico em operação.

Visto que a utilização desta mistura asfáltica está longe dos grandes centros rodoviários ou acadêmicos, conforme já explanado, tal questão não foi ainda estudada a fundo, de maneira que se possa descobrir em laboratório, por meio de ensaios usuais na mistura asfáltica compactada ou ensaios adaptados, a existência de deficiências nas propriedades volumétricas ou mecânicas produzidas com a areia inapropriada.

Assim, existe a falta de um ensaio específico na mistura de areia asfalto usinada a quente que possa dirimir o questionamento de pesquisadores e engenheiros quanto à influência do baixo valor do equivalente de areia.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi estruturado em quatro capítulos, conforme descritos a seguir:

O primeiro capítulo é composto pela introdução, objetivo geral, objetivos específicos e justificativa, abordando o tema em estudo e contextualiza a sua importância para a pavimentação asfáltica.

O segundo capítulo consta o referencial teórico além de conceitos básicos sobre os revestimentos asfálticos e os ensaios que norteiam a análise dos materiais e das misturas asfálticas. É abordada também a questão da coleta dos materiais utilizados na pesquisa, indicado o local e a procedência de cada.

No terceiro capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais, areia A, areia B e o CAP, bem como os ensaios das propriedades mecânicas, volumétricas e de desgaste das misturas asfálticas.

No capítulo quarto são apresentadas as considerações finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

São apresentados apêndices com os gráficos das células de carga e dos deslocamentos em função do tempo obtidos a partir do ensaio de Módulo de Resiliência para as misturas utilizando areia A e B.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica da literatura acadêmica inicialmente sobre a pavimentação no Brasil e os principais tipos de revestimentos utilizados. Como o foco desta pesquisa é avaliar os efeitos do resultado de equivalente areia fora dos requisitos da norma para misturas de areia asfalto a quente, são apresentados conceitos e análise sobre este ensaio e sobre os demais ensaios necessários para a caracterização completa das misturas em estudo.

#### 2.1.1 Breve histórico da pavimentação no Brasil

A partir dos anos 50 o Brasil iniciou efetivamente a construção de vias revestidas com material betuminoso, devido à instalação da primeira refinaria de petróleo que ocorreu em 1953, pelo atual Presidente da República Getúlio Vargas, porém a refinaria começou a entrar em funcionamento apenas em 1955.

No ano de 1956, o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) começou a ser ofertado e produzido pela Refinaria Presidente Bernardes em Cubatão/SP (RPBC), onde se iniciou uma nova fase na pavimentação com a instalação da técnica do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ).

Houve uma expansão nos anos 60 e 70 na malha rodoviária brasileira, onde cerca de 20% dos gastos totais do setor público foi destinado à construção e manutenção de estradas (CORDEIRO, 2006).

Segundo Silva (2011), o Brasil apresentou um crescimento tardio da malha pavimentada se comparado aos Países desenvolvidos, porém apesar do número baixo de rodovias pavimentadas, o País apresenta um impulso na ampliação da extensão de vias pavimentadas.

A partir de meados da década de 70 houve uma redução dos recursos destinados pavimentação e com o baixo volume de tráfego nas rodovias pavimentadas até então, motivou a busca e aplicação de pavimentos com soluções mais econômicas, denominadas de baixo custo, sendo a AAUQ uma solução.

O Governo Federal, atualmente, tem investido em recursos em obras de implantação, duplicação e manutenção da malha rodoviária brasileira, pois há uma preocupação com o desenvolvimento da infraestrutura do País e com a melhoria do transporte rodoviário.

### **2.1.2 Introdução à Pavimentação**

Atualmente o modal rodoviário é o mais utilizado no Brasil e vem crescendo com o passar do tempo, com isso a pavimentação das estradas rodoviárias se tornou um ponto cada vez mais importante para o desenvolvimento da economia.

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. (BERNUCCI *et al.*, 2007, p. 09).

Segundo o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2005), pavimento é uma superestrutura formada por um sistema de camadas de espessuras finitas, dispostos sobre um semi-espaço conceituado teoricamente como infinito, assentado sobre a infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é denominada de subleito.

O Manual de Projeto e Práticas Operacionais para Segurança nas Rodovias (DNIT, 2010), determina que um pavimento deva atender alguns atributos para possuir um grau de segurança adequado, dentre os atributos estão: suportar os efeitos do mau tempo, permitir deslocamento suave, não causar degradação excessiva dos pneus, possuir uma estrutura forte, resistir ao desgaste, possuir uma drenagem adequada e ter boa resistência a derrapagens.

Portanto, é fundamental que o pavimento seja projetado com a máxima qualidade e mínimo custo possível, para que possa atender aos atributos básicos de segurança e qualidade.

#### **2.1.2.1 Funções do Pavimento**

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2005), as principais funções de um pavimento de acordo com as camadas estruturantes de sua composição são:

- a) Resistir aos esforços horizontais, tornando o mais durável possível a superfície de rolamento;
- b) Resistir e distribuir ao subleito esforços verticais provenientes do tráfego;
- c) Capacidade de fornecer uma superfície com serventia adequada em termos de qualidade ao rolamento, proporcionando conforto, segurança e economia.

Bernucci *et al.* (2007), ressalta que as diversas camadas do pavimento devem ser capazes de suportar os esforços solicitantes e por sua vez, transferir às camadas subjacentes. O desempenho adequado do conjunto de camadas e do subleito relaciona-se à capacidade de suporte e à durabilidade compatível com o padrão da obra e o tipo de tráfego, bem com o conforto ao rolamento e a segurança dos usuários.

#### 2.1.2.2 Camadas do Pavimento

A estrutura do pavimento é concebida, em seu sentido puramente estrutural, para receber e transmitir esforços de maneira a aliviar pressões sobre as camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes (BALBO, 2007, p.35).

Segundo Senço (2001), as camadas que compõem um pavimento são:

- a) Subleito: terreno que servirá de fundação para a execução do pavimento;
- b) Reforço do subleito: possui a finalidade de reduzir a espessura da base, se tornando uma camada complementar do subleito e com capacidade de suporte superior à do subleito;
- c) Sub-base: composta por materiais com boa capacidade de suporte, como a brita, sua principal função é resistir às cargas transmitidas pela base e drenar infiltrações;
- d) Base: camada sobre a qual se constrói o revestimento, usualmente composta por brita ou materiais como betume, cimento ou cal, e é responsável por resistir aos esforços oriundos do carregamento, distribuindo-os às camadas subjacentes;
- e) Revestimento: camada que recebe diretamente as tensões de rolamento e é destinada a melhorar as condições quanto ao conforto e segurança dos veículos, resistindo aos esforços que nela atuam.

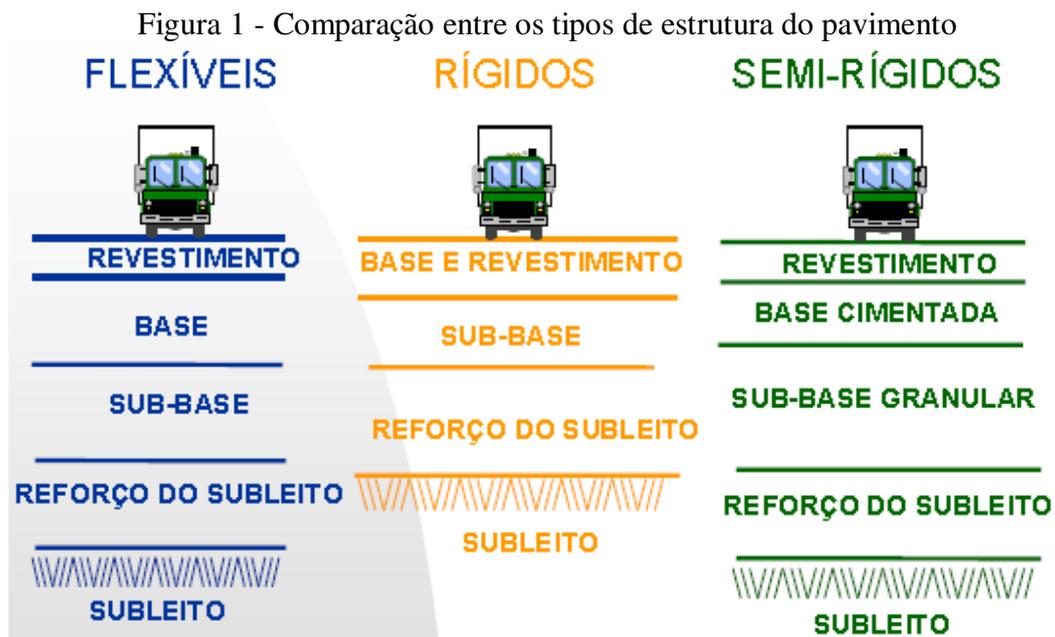
É necessário observar no pavimento a capacidade de manter sua integridade estrutural, sem apresentar falhas significativas, abrangendo as características de resistência e deformabilidade das suas camadas e do subleito sob a ação das cargas atuantes.

As diferentes camadas do pavimento incluem materiais de custo elevado e atenção diferenciada. São estruturas complexas cuja atenção está condicionada ao peso do tráfego, técnicas de construção, solicitações ambientais, rotinas de manutenção e restauração, tipologia e qualidade dos materiais (BERNUCCI *et al.*, 2007).

### 2.1.2.3 Tipos de Pavimentos

O pavimento está relacionado com o estado que a camada de rolamento se encontra. Portanto a durabilidade do pavimento depende das intempéries, intensidade do tráfego e das características estruturais do pavimento (MENDES e NUNES, 2009).

Na engenharia, os pavimentos são subdivididos de acordo com a rigidez das estruturas que os compõem, existindo em geral três tipos de pavimento, os rígidos, os semirrígidos e os flexíveis, conforme Figura 1.



Fonte: Adada (2008)

#### 2.1.2.3.1 Pavimento Rígido

De acordo com Bernucci *et al.* (2007), os pavimentos rígidos, geralmente associados aos pavimentos de concreto, são formados por uma camada de concreto de cimento Portland, em placas armadas ou não, sustentadas sobre uma camada formada de

material granular ou de material consolidado com cimento, denominada de sub-base, disposta sobre o subleito ou sobre um reforço do subleito, caso seja necessário.

Senço (2008) relata que os pavimentos rígidos são aqueles que rompem por tração a flexão, quando são sujeitos a deformações, portanto são pavimentos pouco deformáveis. Os pavimentos rígidos são constituídos principalmente por concreto de cimento Portland.

A placa de concreto de Cimento Portland é o principal elemento estrutural deste tipo de pavimento e em função da sua rigidez à flexão é destinada a aliviar as tensões nas camadas subjacentes quando são provocados grandes esforços de tração na placa (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Em função da absorção dos esforços aplicados na superfície, promovida pela rigidez desse tipo de pavimento, é possível a exclusão da camada de base, presente nos outros tipos de pavimentos que tem a função de resistir aos esforços solicitados.

#### 2.1.2.3.2 *Pavimento Semirrígido*

Segundo Bernucci *et al.* (2007), pavimento semirrígido ou semiflexível, é aquele cujo os revestimentos asfálticos são assentados sobre a base ou sub-base de materiais cimentados, que podem ser solicitados quanto à tração e compressão.

Os pavimentos semirrígidos são situações intermediárias entre os pavimentos rígidos e flexíveis. As misturas solo-cimento, solo-cal, solo-betume são exemplos de materiais que apresentam resistência à tração razoável, podendo ser utilizados em pavimentos semirrígidos (MARQUES, 2002).

Possuem características comuns aos pavimentos rígidos e aos flexíveis, apresentando camadas formadas por composição betuminosa e camadas que possuem alta rigidez, absorvendo a maior parte dos esforços que irão atuar de forma reduzida na fundação. Portanto, são constituídos superficialmente por uma camada de desgaste de materiais betuminosos assentados sobre uma camada de base, que possui uma função estrutural, constituída, por materiais granulares ligados ao cimento.

#### 2.1.2.3.3 *Pavimento Flexível*

Os pavimentos flexíveis, geralmente são associados aos pavimentos asfálticos, compostos por uma camada superficial asfáltica denominada de revestimento, sustentada

sobre camadas de base, de sub-base e de reforço do subleito, formadas por elementos granulares, solos ou misturas de solos, sem a adição de agentes cimentantes (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Segundo o DNIT (2005), nos pavimentos flexíveis todas as camadas sofrem deformações elásticas significativas, quando um carregamento é aplicado, então a carga é distribuída ao longo das camadas. Portanto, são dimensionados normalmente a compressão e a tração na flexão, e muito pouco à tração se comparados aos pavimentos rígidos.

Pavimentos flexíveis são mais comuns no Brasil e, de maneira geral possuem camadas inferiores de solo ou brita além do revestimento asfáltico. São diretamente afetados por variações de temperaturas, e quando recebem sobrecargas imprevistas, o pavimento provavelmente sofrerá prejuízos.

### **2.1.3 Revestimentos Flexíveis**

Revestimento é a camada que se destina a receber diretamente a ação do tráfego e mais diretamente a ação climática. Devendo ser uma camada um tanto quanto impermeável e resistente aos desgastes ocasionados pelo rolamento, aumentando a durabilidade da estrutura (SENÇO, 2008).

A camada de revestimento é a de maior custo unitário de todas as camadas que compõem um pavimento, portanto é necessário muito cuidado na execução e no dimensionamento correto da espessura.

O revestimento de um pavimento flexível pode ser composto de alguns tipos de misturas asfálticas ou tratamentos superficiais. A areia asfáltica usinada a quente, objeto deste trabalho, é uma mistura asfáltica a quente.

A mistura asfáltica usinada a quente é composta do agregado e asfalto, onde o agregado é aquecido até certa temperatura para que ocorra a mistura. Essa mistura pode ser dividida conforme a graduação dos agregados e fíler, em graduação densa, graduação aberta e graduação descontínua.

#### **2.1.3.1 Concreto Asfáltico Denso (CA) ou Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ)**

São as misturas usinadas a quente mais utilizada como revestimentos asfálticos no Brasil. É uma mistura muito resistente, em que se utiliza a graduação densa, podendo ser classificada da seguinte maneira:

- a) O convencional onde se utiliza o CAP (cimento asfáltico de petróleo) e os agregados aquecidos, conforme a especificação DNIT 031/2006 - ES;
- b) O especial com ligante asfáltico de asfalto modificado por polímero ou com asfalto borracha;
- c) O especial com ligante asfáltico de asfalto duro.

A designação CAUQ ou CA é o tipo de mistura mais utilizada para tráfego pesado, consta de uma mistura prévia usinada a quente, com características específicas, composta por agregados minerais graúdos, miúdos, material de enchimento (fíler), se necessário, e ligante asfáltico, para aplicação e execução da camada mediante espalhamento e compressão da mistura a quente.

A norma DNIT 031/2006 – ES possui a seguinte composição para o CAUQ:

- a) Cimento asfáltico de petróleo (CAP);
- b) Fíler mineral – material que passa na peneira nº 200;
- c) Agregado miúdo – material que passa na peneira nº 4 e fica retido na peneira nº 200;
- d) Agregado graúdo – material retido na peneira nº 4.

#### 2.1.3.2 Camada Porosa de Atrito (CPA)

Conhecido também como revestimento asfáltico drenante, é uma mistura asfáltica com granulometria aberta, contendo uma porcentagem de ar em seus vazios, por conta da pequena quantidade de agregado miúdo, fíler e até mesmo de ligante asfáltico. Este tipo de mistura é muito utilizado para o aumento da aderência pneu-pavimento em dias chuvosos.

As características importantes dessa mistura asfáltica é a redução da espessura da lâmina d'água na superfície de rolamento e conseqüentemente das distâncias de frenagem; aumento da aderência pneu-pavimento; redução do spray proveniente do borrifo de água pelos pneus dos veículos, aumentando assim a distância de visibilidade; redução dos riscos de aquaplanagem; e redução da reflexão da luz dos faróis noturnos (BERNUCCI *et al.*, 2007).

O CPA é considerado um revestimento permeável, pois é um tipo de revestimento que coleta a água da chuva para o seu interior por conta do grande volume de vazios, e que é

capaz de percolar rapidamente essa água da chuva até a chegada das sarjetas. Para se obter esse elevado volume de vazios a compactação da dosagem da mistura pelo método Marshall deve ser de 50 golpes por lado.

Porém, uma observação que deve ser analisada nesse tipo de revestimento é que a camada inferior deve necessariamente ser impermeável para evitar a entrada de água no interior da estrutura do pavimento e por consequente o contato com o solo, pois o contato da água com essas camadas pode danificar a estrutura do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2007).

#### 2.1.3.3 Stone Matrix Asphalt (SMA)

O SMA é um tipo de mistura usinada a quente, em que se aumenta o contato entre os agregados graúdos, possuindo uma elevada quantidade de agregados graúdos, e com a ausência dos agregados miúdos, forma-se um grande número de vazios entre os agregados graúdos e tornando o pavimento com uma superfície rugosa. Porém esses vazios são preenchidos por uma mistura constituída por uma fração de areia, filler, ligante asfáltico e fibras, por conta desta mistura o SMA acaba se tornando uma mistura rica em ligante asfáltico.

Segundo Bernucci *et al.* (2007), as principais vantagens do SMA em relação ao desempenho são: boa estabilidade a elevadas temperaturas; boa flexibilidade a baixas temperaturas; elevada resistência ao desgaste; boa resistência à derrapagem devido a rugosidade da superfície de rolamento; redução do spray ou cortina de água durante a chuva; redução do nível de ruído ao rolamento.

#### 2.1.3.4 Gap graded

É uma mistura que recentemente foi introduzida no Brasil, possuindo uma graduação descontínua densa, resultando em uma macroestrutura superficial aberta ou rugosa, mas não possuindo elevado teor de vazios. É uma mistura que está sendo empregada em asfalto-borracha (SENÇO, 2008).

O Gap não se caracteriza com uma mistura aberta e também não possui uma quantidade de materiais finos elevado como o SMA. Sua faixa granulométrica resulta em um revestimento final de macroestrutura superficial rugosa, porém possui um teor de vazios entre 4,0 e 6,0%. A mistura de Gap graded promove uma melhoria evitando problemas de

deformação permanente e trincamento precoce por fadiga, proporcionando maior aderência entre pneu-pavimento e o Gap graded também é considerado um pavimento silencioso (ANTOSCZEZEM JUNIOR, 2012).

#### 2.1.3.5 Areia Asfalto Usinado a Quente (AAUQ)

De acordo com a norma DNIT 032/2005 – ES, areia asfalto a quente é a mistura executada a quente, composta por areia como agregado miúdo, filler como material de enchimento, se necessário, e cimento asfáltico espalhado e compactado a quente, que devem estar de acordo com as faixas encontradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Faixas granulométricas e características de dosagem recomendadas pelo DNIT para AAUQ (DNIT 032/2005-ES)

Peneiras		Faixas		
		Porcentagem em massa, passando		
ABNT	Abertura (mm)	A 4,75mm	B 2,0mm	Tolerância
3/8"	9,5	100	-	-
Nº 4	4,8	80-100	100	± 5%
Nº 10	2	60-95	90-100	± 4%
Nº 40	0,42	16-52	40-90	± 4%
Nº 80	0,18	4-15	10/47	± 3%
Nº 200	0,075	2-10	0-7	± 2%
Emprego		Revestimento		
Teor de asfalto, % sobre o total da mistura		6,0-12,0	7,0-12,0	± 3%
Volume de vazios, %		3,0-8,0		
Relação betume/vazios, %		65-82		
Estabilidade, kN, mín.		30		
Fluência, mm		2,0-4,0		

Fonte: Bernucci *et al.* (2007)

Além da norma DNIT 032/2005 – ES existe ainda a norma DERT – ES – P 14/00 do Estado do Ceará que apresenta outras faixas granulométricas e características para a dosagem das misturas do tipo AAUQ, quando o agregado possuir uma quantidade de finos mais elevada do que os limites das faixas do DNIT 032/2005 – ES, Tabela 2.

Tabela 2 - Faixas granulométricas e características de dosagem recomendadas pela norma DERT – ES – P 14/00 para AAUQ

Peneiras		Faixas			
		Porcentagem em massa, passando			
		A	B	C	Tolerância
N° 4	4,8	100	100	100	± 5%
N° 10	2	90-100	90-100	85-100	± 5%
N° 40	0,42	40-90	30-95	25-100	± 5%
N° 80	0,18	10-47	7-60	8-62	± 3%
N° 200	0,075	0-7	0-10	0-12	± 2%
Emprego		Revestimento			
Volume de vazios, %		3,0-8,0			
Relação betume/vazios, %		65-82			
Estabilidade, kN, mín.		30			
Vazios no agregado mineral (%)		min 22			

Fonte: DERT – ES – P 14/00 (2000)

Algumas regiões não possuem agregados pétreos graúdos, portanto se utiliza como revestimento uma argamassa de agregado miúdo, geralmente areia, ligante (CAP), e fíler se necessário, com um maior consumo de ligante do que os concretos asfálticos convencionais devido ao aumento da superfície específica (BERNUCCI *et al.*, 2007).

A mistura areia-asfalto é preparada a quente em usina adequada, sendo a fração granular composta por agregado miúdo (areia) e material de enchimento (fíler) quando for o caso. Tal material presta-se como camada de revestimento, de regularização e de base de pavimentos asfálticos (BALBO, 2007, p. 183).

Segundo Dias (2004), soluções alternativas como revestimentos de areia asfalto, reafirmam-se de grande valia para pavimentos de baixo custo e onde há abundância de areias e falta de agregados pétreos.

A AAUQ é normalmente empregada como revestimento de rodovias de tráfego não muito elevado, e por ser uma mistura usinada a quente, tanto o agregado quanto o ligante é aquecido antes da mistura e são aplicados e compactados a quente. Devido à elevada quantidade de ligante asfáltico e a presença de agregados de pequenas dimensões, é necessário muito cuidado na execução, podendo apresentar uma menor resistência às deformações permanentes se comparada a outras misturas a quente (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Conforme as normas do DNIT 031/2006 – ES e a 032/2005 – ES, para a execução do revestimento de AAUQ a temperatura do cimento asfáltico empregado na mistura deve ser determinada para cada tipo de ligante, em função da relação temperatura-viscosidade. A produção é efetuada em usinas apropriadas e deve ser transportada, da usina ao ponto de

aplicação, em caminhões basculantes. A distribuição da AAUQ deve ser feita por máquinas acabadoras e não deve ser aplicada a temperatura ambiente inferior a 10°C.

Imediatamente após a distribuição, tem início a compactação. A compactação deve ser iniciada pelos bordos, longitudinalmente, continuando em direção ao eixo da pista. Os revestimentos recém acabados devem ser mantidos sem tráfego até o seu completo resfriamento (DNIT 032/2005 – ES).

Com todos os cuidados necessários na escolha dos materiais e na execução do revestimento, a AAUQ apresenta resultados satisfatórios (SANT'ANA, 2009).

#### **2.1.4 Ensaios**

De acordo com Bernucci *et al.* (2007), os revestimentos utilizados nos pavimentos são constituídos por agregados de vários tamanhos e proporções que são mantidos unidos por um ligante asfáltico. O desempenho do revestimento será tanto melhor quanto maior for o entendimento de como seus elementos reagem juntos sob as condições que são empregadas no pavimento. E para esse bom desempenho existe uma série de fatores que atuam em conjunto para que a estrutura tenha o desempenho adequado, portanto é necessário o conhecimento sobre as propriedades dos materiais utilizados.

##### 2.1.4.1 Agregados miúdos

###### 2.1.4.1.1 Granulometria

A análise granulométrica resume-se em quantificar a distribuição das dimensões das partículas que constituem um solo em suas diferentes frações sólidas, determinando as suas porcentagens de ocorrência. A norma que fixa o procedimento para análise de agregados por peneiramento é a DNER-ME 083/98.

Os agregados podem ser classificados quanto ao tamanho, para o uso em misturas asfálticas, sendo eles os agregados graúdos, miúdos e material de enchimento ou fíler (DNIT 031/2004 – ES):

- a) Graúdos: são aqueles maiores que 2,0mm, ficando retido na peneira nº 10.
- b) Miúdos: são aqueles maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm, ficando retido na peneira nº200.

- c) Material de enchimento ou filler: são aqueles que pelo menos 65% de suas partículas são menores que 0,075mm.

Os tamanhos das peneiras a serem utilizadas na análise granulométrica são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dimensões nominais das peneiras

Dimensão da Peneira		Abertura da Peneira	
Padrão	Número	Milímetros	Polegadas
75,0mm		75,0	3
50,0mm		50,0	2
37,5mm		37,5	1,5
25,0mm		25,0	1
19,0mm		19,0	0,75
9,5mm		9,5	0,375
4,75mm	4	4,75	0,187
2,36mm	8	2,36	0,0937
2,00mm	10	2,00	0,0789
1,18mm	16	1,18	0,0469
600µm	30	0,600	0,0234
425µm	40	0,425	0,0168
300µm	50	0,300	0,0117
150µm	100	0,150	0,0059
75µm	200	0,075	0,0029

Fonte: Bernucci *et al.* (2007)

#### 2.1.4.1.2 Equivalente Areia

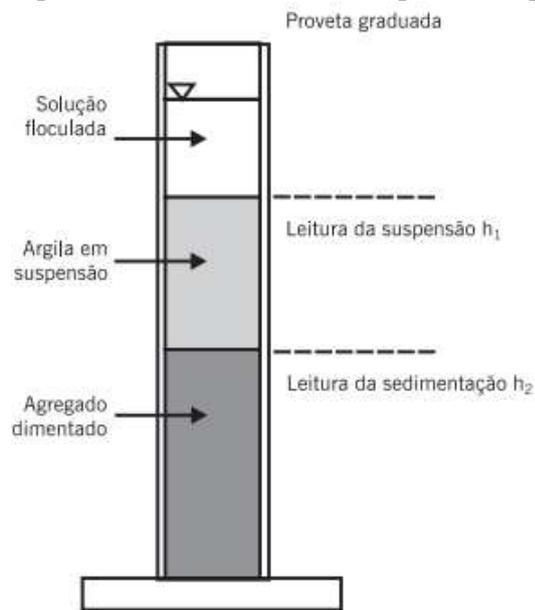
Os agregados utilizados na pavimentação devem ser livres de materiais como argila, matéria orgânica, pó, silte, pois, provocam uma perda na adesão com o ligante. A limpeza de um agregado é determinada através do ensaio de equivalente de areia, que verifica a presença de material plástico no agregado.

De acordo com o DNIT (2005), equivalente areia é o ensaio utilizado na pavimentação no controle de finos em materiais granulares, finos estes que podem provocar retração e inchamento na mistura asfáltica. Este ensaio é normatizado pela DNER-ME 054/97, onde se determina a pureza de um solo em relação à porcentagem de argila que ele contém.

Equivalente de areia é a relação entre a altura do nível superior da areia e o nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo. O ensaio consta em uma amostra de agregado obtida com o material que passa na peneira 4,8mm medida em

volume numa cápsula padrão, é colocada em uma proveta contendo uma solução concentrada e mantida em repouso por 10 minutos. Em seguida o conjunto é agitado por cerca de 30 segundos e logo após a proveta é completada com a solução concentrada até um nível de referência, e deixado em repouso por 20 minutos. Após esse período, é determinada a altura de material em suspensão. Com um pistão padronizado que é introduzido na proveta, é determinada a altura da camada de areia depositada, conforme é mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema de proveta com os materiais depositados para a leitura final



Fonte: Bernucci *et al.* (2007)

O cálculo do equivalente areia é determinado por meio da expressão 1:

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da areia}}{\text{Leitura no topo da argila}} \cdot 100 \quad (1)$$

É necessário que o valor de equivalente areia seja de pelo menos 55% para ser utilizado em concreto asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2007).

#### 2.1.4.1.3 Limites de Consistência

Se um solo possui muita umidade, ele se mostra na forma de um fluído denso, apresentando o estado líquido e à medida que sua água evapora, ele se endurece passando para o estado plástico. É denominado limite de liquidez essa umidade que separa o estado líquido do plástico. Continuando com a perda da umidade esse solo prossegue no processo de endurecimento, passando assim para o estado semissólido, tendo como o limite de

plasticidade a umidade que separa esses estados. E segundo o DNIT (2005), esses limites permitem avaliar a plasticidade dos solos.

a) Limite de liquidez (LL):

Segundo a norma DNER-ME 122/94, limite de liquidez é o teor de umidade do solo com o qual se unem as bordas inferiores de uma canelura feita em uma massa de solo, sob a ação de golpes.

A quantidade de material necessária para o ensaio é cerca de 70g, adiciona-se água ao material até resultar uma massa plástica. A massa é transferida para o aparelho de Casagrande, ilustrado na Figura 3 abaixo, e dividida formando uma canelura em seu centro. Golpeia-se o aparelho até que as bordas inferiores da canelura se unam em 1cm registrando-se o número de golpes e retirando uma pequena quantidade do material para determinação do teor de umidade.

Figura 3 - Aparelho de Casagrande



Fonte: Autora (2016)

O limite de liquidez é determinado a partir de um gráfico que relaciona as porcentagens de umidade e os números de golpes, originando uma reta. O ponto de 25 golpes no gráfico determina o limite de liquidez do material ensaiado.

b) Limite de plasticidade (LP):

Segundo o Senço (2008), no ensaio, é expresso pelo mais baixo teor de umidade com que um cilindro de solo de cerca de 10 cm de comprimento é rolado até romper-se.

O ensaio de limite de plasticidade é determinado pela DNER-ME 082/94, o qual é definido como sendo a transição entre o estado plástico e o semi-sólido. O ensaio é realizado com cerca de 50g da amostra que passa na peneira nº 40, em que se adiciona água a essa

amostra até formar uma massa plástica. Forma-se uma pequena bola com a amostra que será rolada sobre uma placa de vidro até resultar a forma de um cilindro, conforme a Figura 4. Se chegar a 3mm sem se fragmentar amassa-se o material e procede-se como anteriormente, repetindo a operação até o cilindro se fragmentar quando atingir 3mm de diâmetro. Retiram-se alguns pedaços do cilindro fragmentado e determina-se a umidade em estufa. É necessário que o procedimento seja repetido até que se obtenham três valores que não difiram da respectiva média de mais de 5%.

Figura 4 - Placa de vidro com o rolinho cilíndrico



Fonte: Autora (2016)

#### 2.1.4.1.4 *Densidade Real*

O ensaio DNER-ME 084/95 é utilizado na determinação da densidade real dos grãos de agregados miúdos ( $D_r$ ). A densidade determinada por este método é a relação da massa de determinado volume de amostra a 25°C para a massa de igual volume de água destilada à mesma temperatura.

O ensaio consta no quarteamento da amostra de cerca de 1000g, onde é peneirada nas peneiras n° 4 e n° 200 e se retira cerca de 500g do material retido entre as peneiras para a execução do ensaio. A amostra é seca em estufa até massa constante e resfriada para a continuação do ensaio. O picnômetro vazio é pesado e dentro é colocada a amostra, a seguir coloca-se água destilada até cobrir a amostra. O conjunto então é aquecido até a fervura por cerca de 15 minutos e logo após resfriado em banho d'água à 25°C. O frasco é completado com água destilada até a marca de referência e pesado, logo após se retira todo conteúdo do

frasco, coloca-se água destilada no frasco e pesá-lo em seguida. A densidade real do agregado será calculado segundo a expressão 2:

$$D_{25} = \frac{b-a}{(d-a)-(c-b)} \quad (2)$$

Onde:  $D_{25}$  = densidade real de agregado miúdo, a 25°C;

a = massa do picnômetro vazio e seco (g);

b = massa do picnômetro mais amostra (g);

c = massa do picnômetro mais amostra mais água (g);

d = massa do picnômetro cheio d'água (g).

#### 2.1.4.1.5 Teor de matéria orgânica

Os materiais orgânicos são materiais indesejáveis que se encontram presentes nas areias e que devida a sua origem orgânica exercem ação prejudicial sobre as misturas asfálticas. A determinação do teor de matéria orgânica presente no material a ser utilizado é feita através do ensaio normatizado pela NBR 13600 – Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C.

O ensaio consiste na queima do material orgânico presente na amostra, em mufla, à temperatura de  $(440 \pm 5)^\circ\text{C}$ . Pesa-se 50g no mínimo do material a ser ensaiado, e coloca-o em um cadinho de porcelana, onde é coberto com papel alumínio, então o material é levado a estufa em temperatura de 105°C a 110°C, onde deve permanecer por mínimo por 24h. Remove-se o papel alumínio e transfere-se o cadinho contendo o material para a mufla, onde gradualmente a temperatura é elevada até atingir  $(440 \pm 5)^\circ\text{C}$ . A amostra permanece na mufla até a queima total da matéria orgânica, em torno de 12h. Retira-se o cadinho da mufla, cobre-o novamente com o papel alumínio e o transfere para o dessecador, onde deve permanecer até atingir a temperatura ambiente, para então poder registrar a massa do conjunto. A determinação do teor de matéria orgânica é feita através da expressão 3:

$$MO = \left(1 - \frac{B}{A}\right) \cdot 100 \quad (3)$$

Onde: MO= teor de matéria orgânica, em %;

A = massa da amostra seca em estufa, em g;

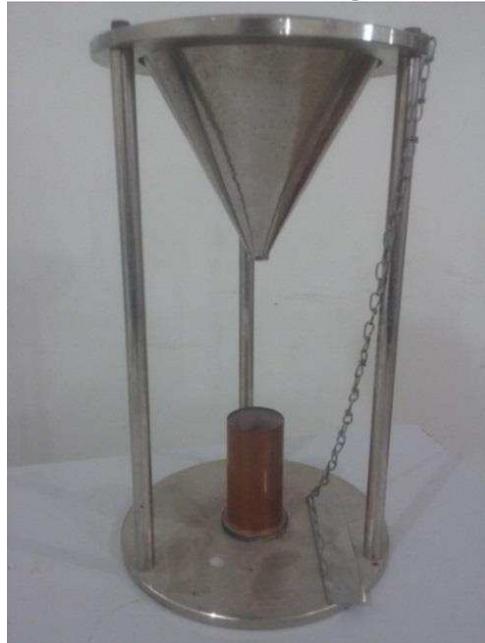
B = massa da amostra queimada em mufla, em g.

#### 2.1.4.1.6 Angularidade

Gouveia (2002), afirma que a resistência e a trabalhabilidade das misturas asfálticas podem ser afetadas pela forma, angularidade e textura superficial dos agregados, e que as partículas achatadas e alongadas são indesejáveis nas misturas asfálticas. Misturas que contenham partículas angulares possuem intertravamento e atrito interno maior que as misturas que possuem partículas arredondadas, pois resulta em uma maior estabilidade mecânica a mistura.

O ensaio de angularidade do material fino (FAA) é regularizado pela Superpave, onde avalia a forma, a angularidade e a textura superficial dos agregados finos. De acordo com a norma ASTM C 1252, a angularidade do fino é avaliada quando a amostra é vertida de uma altura de queda estabelecida, dentro de um cilindro de 100cm<sup>3</sup>, de acordo com a Figura 5.

Figura 5 - Aparelho utilizado no ensaio de angularidade de agregados finos



Fonte: Autora (2016)

O material em excesso que fica sobre o topo do cilindro é arrasado e então se determina a massa de agregado fino retido no cilindro, o volume de agregado contido no cilindro e então se calcula os vazios não compactados, conforme a expressão 4:

$$U = \left( \frac{V_c - \frac{m_a}{\rho_{ap}}}{V_c} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

Onde: U= vazios não compactados, em %;

V<sub>c</sub> = volume do cilindro, em cm<sup>3</sup>;

$m_a$  = massa do agregado contida no cilindro, em g;

$\rho_{ap}$  = massa específica aparente do agregado fino, em g/cm<sup>3</sup>.

Para o ensaio ser realizado é necessário que o agregado utilizado esteja de acordo com um dos três métodos indicados pela norma, sendo o A, B e o C, em que se muda apenas a quantidade de material retido em cada peneira para a realização do ensaio. O método A utiliza uma combinação de frações específicas e o método B utiliza três frações individuais específicas sendo realizado o ensaio em cada fração de agregado separadamente, Tabela 4. No método C não há controle de granulometria, sendo apenas ensaiado 190g de agregado miúdo. Para a real determinação do valor de FAA o ideal é se utilizar os três métodos indicados pela norma.

Tabela 4 – Frações granulométricas utilizadas nos métodos A e B

Peneira (passado - retido)	Método A (g)	Método B (g)
2,36mm - 1,18mm	44	190
1,18mm - 0,60mm	57	190
0,60mm - 0,30mm	72	190
0,30mm - 0,15mm	17	-
TOTAL	190	-

Fonte: ASTM C 1252 (2003)

O Superpave especifica valores mínimos para o ensaio de FAA com o nível de tráfego ou com a proximidade da camada em relação à superfície, valores estes expressos na Tabela 5.

Tabela 5 - Especificação Superpave de valores mínimos para FAA

Tráfego N=10 <sup>6</sup>	Profundidade da camada em relação à superfície do pavimento	
	< 100 mm	> 100 mm
< 0,3	-	-
< 1	40	-
< 3	40	40
< 30	45	40
< 100	45	45
> 100	45	45

Fonte: Cominsky *et al.* (1998)

#### 2.1.4.2 CAP

#### 2.1.4.2.1 Penetração

Segundo o Senço (2008), penetração é distancia medida em décimos de milímetros que uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de material seguindo três condições: a carga de 100g, temperatura a 25°C e o tempo de aplicação da carga de 5 segundos.

Conforme a DNER-ME 003/99, ao iniciar o ensaio de penetração, aquece-se a amostra de CAP até uma temperatura mínima definida, em seguida coloca-se a amostra em um recipiente fechado e mantem-se em uma temperatura de 25°C por cerca de 90 minutos para resfriamento, após isso se coloca a amostra em um banho d'água por mais 90 minutos.

A seguir colocando a amostra sob a agulha no penetrômetro e ajustando a escala para a leitura zero, libera-se a agulha para a penetração durante 5 segundos anotando o resultado obtido. Repete-se o ensaio por mais duas vezes, encontrando o valor da penetração do concreto asfáltico pela média desses três valores encontrados, desprezando valores que se afastem mais que os indicados na Tabela 6.

Tabela 6 - Critérios para indicação de resultados

Penetração	0 até 49 0,1 mm	50 até 149 0,1 mm	150 até 249 0,1 mm	≥ 250 0,1 mm
Diferença máxima entre o valor mais alto e valor mais baixo das determinações.	2	4	12	20

Fonte: DNER-ME 003/99

#### 2.1.4.2.2 Viscosidade de Saybolt-Furol

A viscosidade de Saybolt-Furol segundo Senço (2008) é o tempo em segundos para que 60ml de material betuminoso fluam ininterruptamente no viscosímetro de Saybolt-Furol através de um orifício. Determinar a consistência dos materiais betuminosos em estado líquido de forma pratica é o objetivo principal desse ensaio.

A norma que determina a viscosidade de Saybolt-Furol é a NBR - 14950/03, e para que o ensaio seja realizado, deve-se aquecer a amostra até uma temperatura mínima para que ela seja liquefeita, colocando logo em seguida em um tubo do viscosímetro e coando o material através de uma peneira. Logo após, eleva-se a temperatura do banho até uma temperatura especificada, mantendo-a por no mínimo 1 minuto, após essas operações

posiciona-se o recipiente em que a amostra será colhida, puxa-se a rolha e se dá a partida no cronômetro, parando-o quando o volume no recipiente chegar a 60ml, de acordo com a Figura 6. Repete-se o ensaio mais uma vez por medida de segurança, se o resultado de ambos os testes não se distanciarem mais de 5 segundos, a viscosidade será a média dos dois valores obtidos nos testes.

Figura 6 - Ensaio de Viscosidade de Saybolt-Furol



Fonte: Autora (2016)

#### 2.1.4.2.3 Ponto de Amolecimento

Segundo Senço (2008), o objetivo do ensaio de ponto de amolecimento é a determinação da temperatura em que os concretos asfálticos se tornam fluídos. O ponto de amolecimento é uma medida em temperatura, na qual o asfalto amolece quando aquecido em certas condições e uma esfera de aço pesando aproximadamente 3,4g passa por ele tocando uma placa de referência.

No centro de uma amostra de asfalto que está dentro de um anel metálico padronizado é colocado uma bola de aço de peso e dimensões estabelecidas, aquecendo-o a uma velocidade de 5°C por minuto até o momento em que a amostra não suportar o peso da bola, no instante em que a mistura toca a placa é marcada a temperatura.

O ensaio que é normatizado pela norma DNIT 131/2010 deve ser realizado pelo menos duas vezes, tendo como resultado a média dos resultados atingidos desde que a diferença entre eles não ultrapasse 1°C, caso ocorra, deve-se refazer todo o ensaio.

### 2.1.4.3 Propriedades Mecânicas, Volumétricas e de Desgaste da Mistura Asfáltica

#### 2.1.4.3.1 *Dosagem, Estabilidade e Fluência Marshall*

O método de dosagem Marshall é um procedimento para estabelecer a proporção de agregado e ligante capaz de resistir às cargas e pressões de pneus de veículos, que tem como principal objetivo a dosagem de misturas econômicas com agregados e ligantes. A norma que apresenta os procedimentos desse método é a DNER-ME 043/95.

A estabilidade Marshall é considerada o ensaio mais convencional referente à avaliação mecânica de propriedades das misturas asfálticas.

O processo Marshall se inicia com a realização da granulometria dos agregados que irão compor a mistura e são determinadas as massas específicas reais do CAP e dos agregados, e seleciona-se a faixa granulométrica a ser utilizada de acordo com a mistura asfáltica.

A composição dos agregados é escolhida de forma a enquadrar a sua mistura nos limites da faixa granulométrica escolhida. A determinação da temperatura de mistura e de compactação é feita a partir da curva de viscosidade-temperatura do ligante escolhido, conforme a norma NBR - 14950/03.

Adotam-se cinco teores de asfalto para diferentes grupos de CPs a serem moldados, onde são determinados nesses corpos de prova a densidade teórica, a densidade aparente, a porcentagem de vazios, os vazios cheios de betume, os vazios de agregado mineral e a relação betume-vazios.

O ensaio de estabilidade é feito na prensa Marshall, onde os corpos de provas são submetidos à deformação, com uma velocidade padrão, até a ruptura, medindo-se neste instante a carga máxima que é o valor da estabilidade Marshall, Figura 7.

Figura 7 - Prensa Marshall



Fonte: Autora (2016)

No medidor de Fluência se mede o valor da deformação da mistura betuminosa, que é o valor do índice de deformação da mistura.

Realizados os ensaios em cada tipo de traço é elaborado gráfico das variações dos parâmetros em função dos teores de asfalto, onde são traçados as curvas de estabilidade, vazios, relação betume-vazios e fluência. Nos gráficos são marcados intervalos dados pelos limites das especificações, onde se obtém vários intervalos de porcentagem de ligantes, em que os seus extremos de porcentagem de ligantes atendem aos intervalos estabelecidos pela norma. Esses extremos determinam um intervalo de porcentagem de ligante onde qualquer ponto satisfaz às normas. Os parâmetros usados no método Marshall para misturas asfálticas usinadas a quente devem-se enquadrar nos limites mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Ensaio Marshall - valores limites para misturas convencionais

Determinação	Concreto Asfáltico	Areia Asfalto a Quente
Porcentagem de vazios (%)	3 a 5	3 a 8
Relação Betume/Vazios (%)	75/82	65/82
Estabilidade mínima (kgf)	500 (75 golpes)	300 (75 golpes)
Fluência (mm)	-	2,0 a 4,5

Fonte: DNER 031/05 – ES e DNER 032/05 – ES (2005)

### 2.1.4.3.2 Densidade Aparente da Mistura

A densidade aparente ou massa específica aparente é obtida a partir de corpos de prova de uma mistura asfáltica compactada, onde o DNER-ME 117/94 fixa o modo pelo qual se faz a determinação. Sendo a densidade aparente da mistura a relação entre a massa da mistura ao ar e a diferença entre a massa ao ar e a massa da mistura em suspensão na água, Figura 8.

Figura 8 - Corpo de prova em suspensão na água



Fonte: Autora (2016)

O cálculo da densidade aparente da mistura asfáltica é realizada através da expressão 5:

$$D_{ap} = \frac{P}{V} \quad (5)$$

Onde:  $D_{ap}$  = densidade aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$P$  = massa ao ar (g);

$V$  = volume/massa em suspensão na água ( $\text{cm}^3$ ).

### 2.1.4.3.3 Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

A resistência à tração (RT) tem se mostrado um importante parâmetro para a caracterização de misturas asfálticas. É um ensaio de ruptura, onde o corpo de prova é posicionado horizontalmente e a carga é aplicada de forma progressiva.

Segundo Bernucci *et al.* (2007), as misturas asfálticas devem possuir flexibilidade suficiente para suportar as solicitações do tráfego e resistência à tração adequada para evitar rupturas precoces.

O procedimento de ensaio é baseado na DNER ME 138/94, e consta em fazer medições de altura do corpo de prova e do diâmetro, deixar o corpo de prova na câmara de aquecimento ou sistema de refrigeração, em temperatura constante de 25°C durante 2 horas, e colocá-lo então na posição horizontal sobre o prato inferior da prensa, Figura 9.

Figura 9 - Equipamento utilizado para ensaio de RTCD



Fonte: Autora (2016)

É aplicada então uma carga gradual, à razão de 0,8mm/s  $\pm$  0,1mm/s, até que se dê a ruptura com a separação das duas metades do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical. Anota-se a carga de ruptura e calcula-se a resistência à tração, de acordo com a expressão 6.

$$RT = \frac{2.F}{\pi.D.H} \quad (6)$$

Onde: RT = resistência à tração (kgf/cm<sup>2</sup>);

F = carga de ruptura (kgf);

D = diâmetro do corpo de prova (cm);

H = altura do corpo de prova (cm).

#### 2.1.4.3.4 Desgaste Cântabro

De acordo com Bernucci *et al.* (2007) é o ensaio utilizado para determinação da resistência à degradação e objetiva avaliar o comportamento de misturas asfálticas quanto à perda de material. O ensaio Cântabro é comumente realizado para misturas porosas (CPA), porém pode ser empregado para as misturas de areia asfalto (Bottin Filho, 1997; Silveira, 1999).

A DNER-ME 383/99 regulamenta o ensaio de desgaste cântabro e é baseada na norma espanhola NTL 362/92. O ensaio consiste na análise das massas de corpos de prova Marshall submetidos ao aparelho de abrasão Los Angeles, Figura 10.

Figura 10 - Equipamento de Abrasão Los Angeles



Fonte: Autora (2016)

Pesa-se inicialmente o corpo-de-prova Marshall e coloca-o no aparelho de abrasão Los Angeles sem as esferas de aço, e efetua-se 300 revoluções na velocidade angular de 30rpm e pesa-se novamente o corpo-de-prova. O desgaste Cântabro é determinado por meio da expressão 7:

$$D = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \cdot 100 \quad (7)$$

Onde: D= valor do desgaste em %;

M1= massa do corpo de prova antes do ensaio;

M<sub>2</sub>= massa do corpo de prova após o ensaio.

Para misturas asfálticas porosas o desgaste máximo admitido é de 25% e o valor do desgaste para cada teor de ligante é realizado a partir de uma média aritmética de três corpos de prova e não pode ser diferindo 20% do valor médio.

#### 2.1.4.3.5 Módulo de Resiliência (MR)

O conhecimento do módulo de resiliência dos materiais que compõem o revestimento asfáltico dos pavimentos é obrigatório para uma análise eficiente de seu comportamento estrutural. Segundo a norma DNER – ME 133/94 o MR de misturas betuminosas é definido como a relação entre a tensão de tração, aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica regular e a deformação específica recuperável correspondente a tensão aplicada, em certa temperatura. Essa carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga, portanto o módulo de resiliência se define conforme a expressão 8 a seguir:

$$MR = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \cdot T \quad (8)$$

Onde: MR= módulo de resiliência

$\sigma_t$  = tensão de tração;

$\epsilon_t$  = deformação específica recuperável;

T = temperatura.

Portanto, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral realizado a  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  é utilizado para determinar a tensão de tração indireta e a carga compressiva correspondente a ser aplicada durante a determinação do MR.

Os corpos de prova cilíndricos utilizados para a realização do ensaio, são de aproximadamente 100mm de diâmetro e 63,5mm de altura moldados no compactador Marshall. Para a execução do ensaio posiciona-se o corpo de prova no interior do suporte para fixação dos transdutores e os coloca na base da estrutura de suporte, entre dois cabeçotes curvos, que são os frisos metálicos. Então o conjunto é fixado e justado os transdutores LVDTs, e é possível observar o perfeito assentamento do pistão de carga e dos cabeçotes no corpo de prova, Figura 11.

Figura 11 - Corpo de prova ajustado no equipamento para ensaio de Módulo de Resiliência



Fonte: Autora (2016)

Aplica-se 200 vezes uma carga repetida diametral no corpo de prova, de modo a se obter uma tensão menor ou igual a 30% da resistência à tração determinada no ensaio de compressão diametral estático. A frequência de aplicação da carga é de 60 ciclos por minuto, com o tempo de aplicação de carga de 0,1 segundo e com 0,9 segundo de repouso.

Com os valores obtidos no ensaio, a carga aplicada e os deslocamentos horizontais recuperáveis obtidos, calcula-se o módulo de resiliência por meio da expressão 9:

$$MR = \frac{P}{\Delta \times H} \cdot (0,9976 \cdot \mu + 0,2692) \quad (9)$$

Onde: MR= módulo de resiliência (MPa);

P = carga vertical repetida aplicada (N);

$\Delta$  = deslocamento resiliente (mm);

H= altura do corpo de prova (mm);

$\mu$ = coeficiente de Poisson (a norma DNER-ME 133/94 recomenda o valor de 0,30).

#### 2.1.4.3.6 Adesividade

O ensaio utilizado para determinação da adesividade é o ensaio de Lottman, descrito na norma AASHTO T 283.

São moldados seis CPs similares com 1.200g de mistura asfáltica com vazios entre 6,5% e 7,5%. O primeiro conjunto de três CPs são colocados dentro de sacos plásticos e imersos em banho d' água a 25°C por  $2 \pm 1$ h. O segundo conjunto de três desses CPs, são colocados em um recipiente com água destilada e aplicando-se vácuo a uma determinada pressão durante 5 a 10 minutos, a fim de obter grau de saturação dos vazios entre 70 e 80% de água.

Envolve-se os CPs em filme plástico e coloca-os dentro de um saco plástico com 10ml de água adicionais, vedando-os em seguida. Coloca-se o segundo conjunto de três CPs para congelamento (-18°C) por um período mínimo de 16h e após imerge-se este conjunto de CPs em um banho de 60°C por um período de 24h. Retira-se o conjunto de três CPs do banho a 60°C, é realizada a imersão dos mesmos em um banho a 25°C por um período de 2h e então se realiza o ensaio de resistência à tração no primeiro conjunto de três CPs não condicionados e no segundo conjunto de três CPs após todo ciclo de condicionamento. A relação entre os valores da resistência à tração por compressão diametral indica a perda de resistência por umidade induzida, devendo ser maior ou igual 0,70, portando a perda de adesividade não deve ser maior que 30%. O cálculo dessa relação é realizado de acordo com a expressão 10.

$$S_1/S_2 = \frac{\frac{2000.F_{seco}}{\pi.H.D}}{\frac{2000.F_{sat}}{\pi.H.D}} .100 \quad (10)$$

Onde:  $S_1/S_2$  = relação da perda de resistência por umidade induzida (%);

$F_{seco}$  = carga aplicada no corpo de prova sem saturação (N);

$F_{sat}$  = carga aplicada no corpo de prova com saturação (N);

D = diâmetro do corpo de prova (mm);

H = altura do corpo de prova (mm).

#### 2.1.4.3.7 *Fadiga por compressão diametral*

Nos pavimentos flexíveis, cabe ao revestimento resistir diretamente à repetição das cargas dos veículos, onde inevitavelmente ocorre a fadiga da mistura asfáltica por causa do acúmulo das repetições das cargas.

Pinto (1991) descreve a fadiga como um processo de deterioração estrutural que um material sofre quando este está submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas, após certo número suficiente de frequências de carregamento. Portanto, a fadiga

pode ser descrita como a diminuição gradual da resistência de um material por efeito de solicitações repetidas.

A vida de fadiga de um material asfáltico pode ser determinada como o número de aplicações de carga necessário para que a mistura atinja a ruptura quando esta estiver sobre dado estado de tensões.

Segundo Motta e Medina (2005), o trincamento por fadiga de um revestimento asfáltico pode iniciar tanto nas fibras inferiores do revestimento e propagando-se por toda a espessura até o aparecimento das trincas na superfície, quanto pode iniciar-se na superfície do revestimento devido às tensões nas fibras superiores.

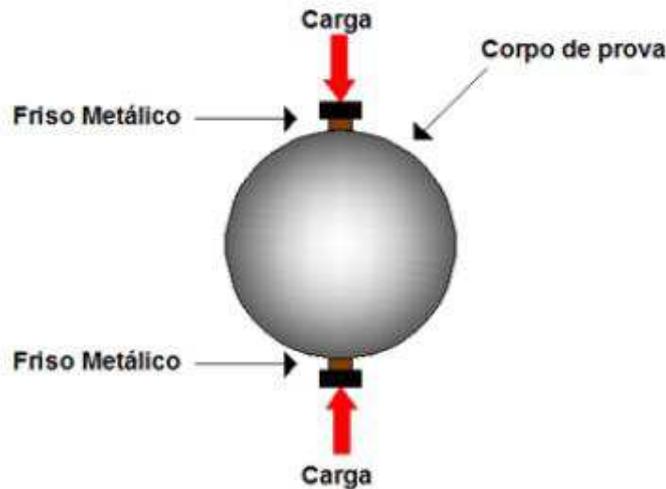
Para a determinação da vida de fadiga das misturas asfálticas são utilizados diferentes tipos de ensaio, onde se leva em consideração a tensão controlada em alguns ensaios e em outros é utilizada a deformação controlada. Segundo Pinto (1991), no ensaio em que a tensão é controlada após a aparição da fissura o material se enfraquece e as cargas seguintes provocam uma ruptura extremamente rápida na mistura asfáltica; no ensaio em que a deformação é controlada, a presença da fissura não implica necessariamente um aumento de tensões nos pontos onde não há as fissuras, e esta se prolonga mais lentamente.

No ensaio com a tensão controlada (TC), a carga aplicada é mantida constante e as deformações aumentam durante a realização do ensaio. Portanto o critério de fadiga está associado à ruptura do corpo-de-prova, logo, a vida de fadiga é definida como o número total de aplicações de uma carga constante necessária para a ruptura completa do corpo de prova.

De acordo com Bernucci *et al.* (2007) no Brasil o ensaio ainda não é normatizado, mas tem sido utilizado largamente no país e normalmente a compressão diametral sob tensão e temperatura controladas. Para a determinação da vida de fadiga pode se utilizado o mesmo equipamento de determinação do módulo de resiliência.

No ensaio utiliza-se uma frequência de 60 aplicações por minuto com 0,10 segundo de duração do carregamento, e então se determina as relações entre o número de repetições à ruptura e o nível de tensões atuantes. Para a realização do ensaio o corpo de prova é colocado em um suporte metálico que irá garantir a centralização do mesmo, Figura 12.

Figura 12 - Configuração do ensaio de fadiga à compressão diametral



Fonte: Colpo (2014)

De acordo com Motta e Medina (2005), o ensaio de fadiga por compressão diametral é o mais utilizado no Brasil para estimar a vida de fadiga de uma mistura asfáltica. O ensaio possui a tensão controlada (TC) e o suporte utilizado para a realização do ensaio pode ser o mesmo do ensaio de modulo de resiliência (MR). A temperatura de ensaio é controlada de 25°C e os corpos de prova necessitam permanecer por no mínimo 2 horas nesta temperatura para garantir que a temperatura será uniforme em todo CP. No ensaio a carga aplicada produz níveis de tensão normal horizontal de 10% a 50% da carga de ruptura estática, onde ocorre o trincamento total e a ruptura do CP. Portanto, no ensaio de fadiga se produz de 10% a 50% das cargas que ocorrem no ensaio de resistência a tração (RT).

Em geral é estabelecido um limite de 4mm de deformação vertical para a determinação do fim do ensaio e então anota-se o número de repetições de carga. Em seguida calcula-se a diferença de tensões e a deformação resiliente segundo as expressões 11 e 12:

$$\Delta\sigma = \frac{4.F}{100.\pi.d.h} \quad (11)$$

$$\epsilon_t = \frac{\%.RT}{MR} \quad (12)$$

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

F = carga aplicada (N);

d = diâmetro do corpo de prova (cm);

h = altura do corpo de prova (cm);

$\epsilon_t$  = deformação resiliente;

% = porcentagem de resistência à tração aplicada;

RT = resistência à tração aplicada (MPa);

MR = módulo de resiliência (MPa).

Plota-se um gráfico com as curvas  $\Delta\sigma$  x Nf (número de aplicações de carga de ruptura) e determina-se a curva de fadiga para o material, de acordo com a expressão 13:

$$Nf = k1. \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{k2} \quad (13)$$

Onde: Nf = número de aplicações de carga de ruptura, no fim do ensaio;

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

k1 e k2 = parâmetros determinados no ensaio.

O ensaio de fadiga por compressão diametral possibilita uma melhor representação das condições de campo, pois o trincamento do corpo de prova tem início em uma zona que possui o estado de tensões uniforme, apresentando um estado biaxial de tensões. O ensaio ainda possui uma boa repetibilidade, reprodutibilidade e é economicamente viável, pois possui uma facilidade na execução e confecção das amostras (TANGELLA *et al.*, 1990).

### 2.1.5 Mecânica dos Pavimentos

A mecânica dos pavimentos foi desenvolvida para a realização do cálculo de pavimentos e o dimensionamento das camadas que o compõem. Portanto objetiva definir com a maior exatidão possível a estrutura capaz de suportar determinado tráfego através do conhecimento das características dos materiais que irão compor as camadas do pavimento (ALBERNAZ, CALDAS E OLIVEIRA, 1996).

Diversos métodos de dimensionamento de pavimentos são utilizados em diferentes países. Nos últimos tempos, com o avanço da tecnologia nota-se uma tendência maior em se utilizar métodos mecânicos.

Os métodos mecânicos analisam as tensões e deformações do pavimento através da teoria da elasticidade e verificam o dimensionamento das espessuras de qualquer uma das camadas do pavimento através de programas computacionais. As análises são realizadas a partir de simulações onde são levadas em conta as propriedades dos materiais que irão compor o pavimento, valores estes obtidos em ensaios laboratoriais.

Para o dimensionamento de um pavimento é necessário a utilização do que chamamos de número “N”, que é o parâmetro de maior importância na maioria dos métodos de dimensionamento de um pavimento. O número “N” representa o número de repetições de carga equivalente ao eixo padrão rodoviário.

As cargas dos veículos são transmitidas ao pavimento através das rodas dos pneumáticos. Como em um pavimento trafegam vários tipos de veículos com variadas cargas em cada eixo, foi necessária a utilização do conceito de eixo padrão rodoviário. Esse eixo padrão possui carga total de 8,2tf e pressão de pneu de 5,5kgf/cm<sup>2</sup>.

Motta e Medina (2005) abordam que o dimensionamento de um pavimento não é apenas uma questão de determinar as espessuras necessárias, mas é também de adequar as características de cada material nas diversas camadas que irão compor o pavimento.

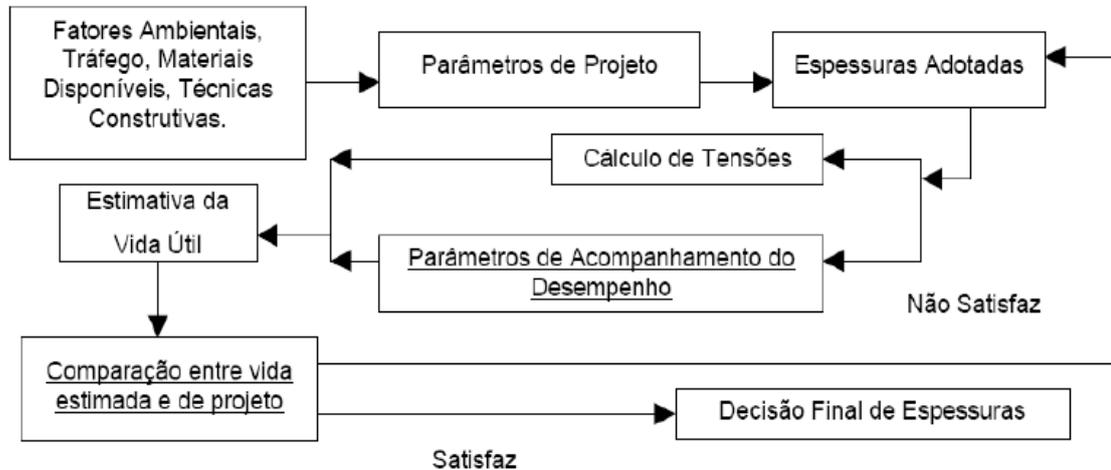
A avaliação de um pavimento segundo o método mecanístico consiste em se testar uma estrutura proposta segundo as premissas de tensões atuantes e de deformações ocorridas, com base na teoria da elasticidade, conseguindo se chegar à melhor configuração estrutural possível, definindo-se as camadas e as espessuras que irão compor a estrutura.

A análise do pavimento através do método mecanístico é realizada através do equilíbrio entre os esforços que são impostos pelas cargas de tráfego, tensões e deformações, e a capacidade resistente dos materiais que irão compor a estrutura do pavimento, fadiga e deformação permanente.

A avaliação com base nos procedimentos mecanísticos de uma determinada estrutura consiste exatamente em verificar se a estrutura proposta segundo as premissas de tensão e deformação, segundo a teoria da elasticidade, até chegar à melhor configuração possível para o pavimento em projeto. O dimensionamento deve ser de tal modo que garanta que a repetição de esforços não cause a ruptura por fadiga dos materiais.

Segundo Motta (1991), se a estrutura colocada em análise não satisfizer algum critério estabelecido às espessuras e/ou às camadas podem ser alteradas e o cálculo é refeito até encontrar uma estrutura final que atenda aos preceitos estabelecidos. Para o dimensionamento dos pavimentos é necessário se basear por um fluxograma de etapas, Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma de dimensionamento mecânico



Fonte: Motta (1991)

No Brasil os programas de maior utilização para o cálculo mecânico de dimensionamento dos pavimentos são: o ELSYM5 (*Elastic Layered System*), o FEPAVE (*Finite Element Analysis of Pavement Structures*), o KENLAYER (*Kentucky Layer Calculation*) e o SisPav (Sistema para Análise e Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Flexíveis).

No presente estudo, por razões práticas, foi escolhido o programa SisPav para o cálculo de tensões e deformações do pavimento. O programa está disponível na Internet, é de fácil aplicação e proporciona resultados confiáveis para o dimensionamento, pois conta com uma base de experiência acadêmica e de uma vasta bibliografia.

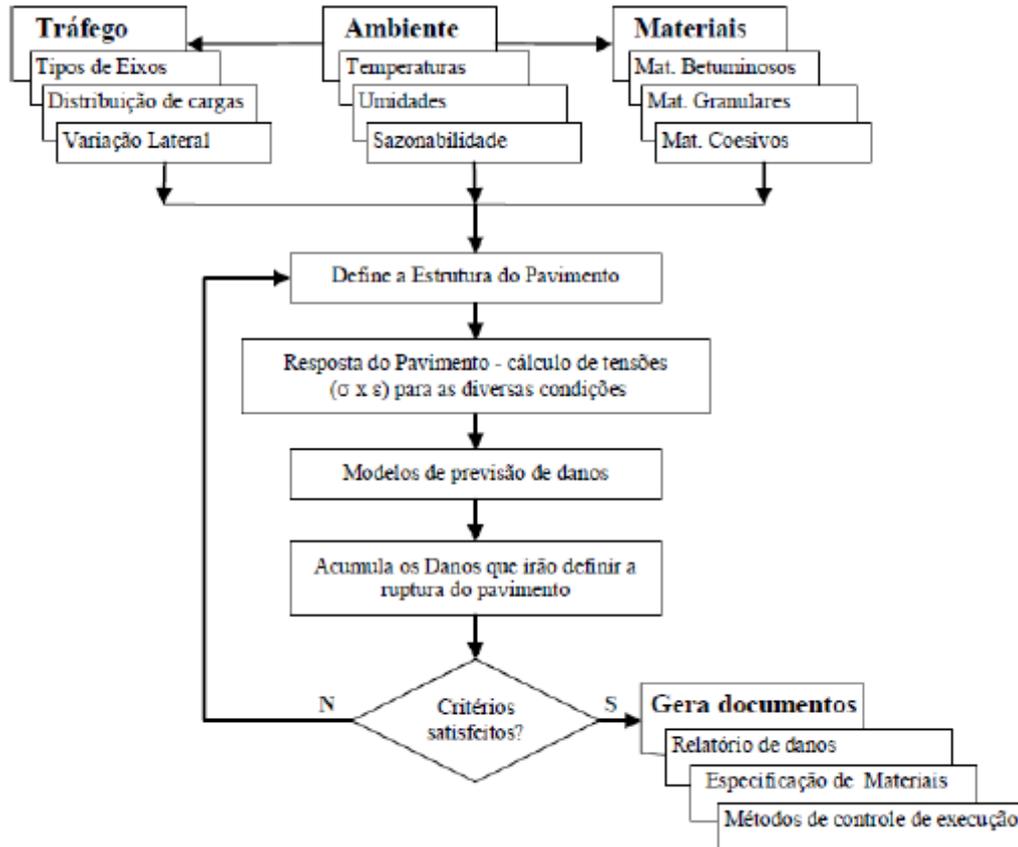
### 2.1.6 Método Mecânico-Empírico – SisPav

No método mecânico tem-se como consideração básica o módulo de resiliência do Material, com análise não-linear simplificada. O programa SisPav foi desenvolvido em 2007 por Franco, onde a avaliação da estrutura do pavimento se dá através de um programa de interface de fácil utilização e com apresentação dos resultados em gráficos e tabelas, por tanto tem o seu uso simplificado.

O SisPav realiza o dimensionamento de um pavimento analisando os valores de entrada e então encontra a espessura da camada que atenda aos requisitos estabelecidos no projeto. Mas o SisPav também pode proporcionar uma avaliação dos dados definidos no projeto e informa a vida de projeto que a estrutura proposta pode suportar.

É necessária a entrada de dados de três grupos de informações para a utilização do programa, o tráfego, o ambiente e os materiais, de acordo com a Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma do método integrado de análise e dimensionamento de pavimentos asfálticos (SisPav)



Fonte: Franco (2007)

Durante o desenvolvimento do SisPav, Franco (2007) testou dois programas de análise, o EFin3D, que utiliza o Método dos Elementos Finitos Tridimensional e o AEMC, Análise Elástica de Múltiplas Camadas, através da teoria da elasticidade. Foi realizada uma comparação dos resultados de tensões, deformações e deslocamentos entre os dois métodos. O AEMC foi selecionado pelo autor como rotina no SisPav pela praticidade e pelas implicações de consideração de configurações de carga, avaliação da variação de tráfego etc.

De acordo com Franco (2007), o AEMC processa os cálculos considerando o comportamento elástico não linear dos materiais. As informações necessárias que devem ser fornecidas para o programa são:

- Materiais asfálticos: Módulo de Resiliência; coeficiente de *Poisson*; geometria da mistura; parâmetros de viscosidade do ligante asfáltico; e índices volumétricos;
- Materiais granulares: Módulo de Resiliência; e coeficiente de *Poisson*;

- c) Solos finos, siltosos ou argilosos: Módulo de Resiliência; e coeficiente de *Poisson*;
- d) Lateritas pedregulhosas e solos lateríticos finos: Módulo de Resiliência; e coeficiente de *Poisson*;
- e) Materiais estabilizados com solo cimento: Módulo de Resiliência; resistência a tração aos 28 dias; e coeficiente de *Poisson*.

O programa aceita inserir as informações da estrutura do pavimento em até 8 camadas e no mínimo em 3 camadas. E as espessuras das camadas durante o dimensionamento são limitadas entre 10cm e 60cm, com exceção do revestimento que varia de 5cm a 20cm.

A influência da temperatura é analisada pelo SisPav, através de uma estimativa de temperatura média mensal do pavimento em função das temperaturas médias do ar e da estimativa da variação do módulo de resiliência das camadas em função da mudança de viscosidade ao longo do tempo e das alterações climáticas do local onde será realizado a obra (FRANCO, 2007).

## 2.2 COLETA DOS MATERIAIS

Para a realização da pesquisa foram colhidos dois tipos de areia, uma areia que se enquadra nas especificações das normas quanto ao ensaio de equivalente de areia (areia A) e uma areia que não se enquadra (areia B).

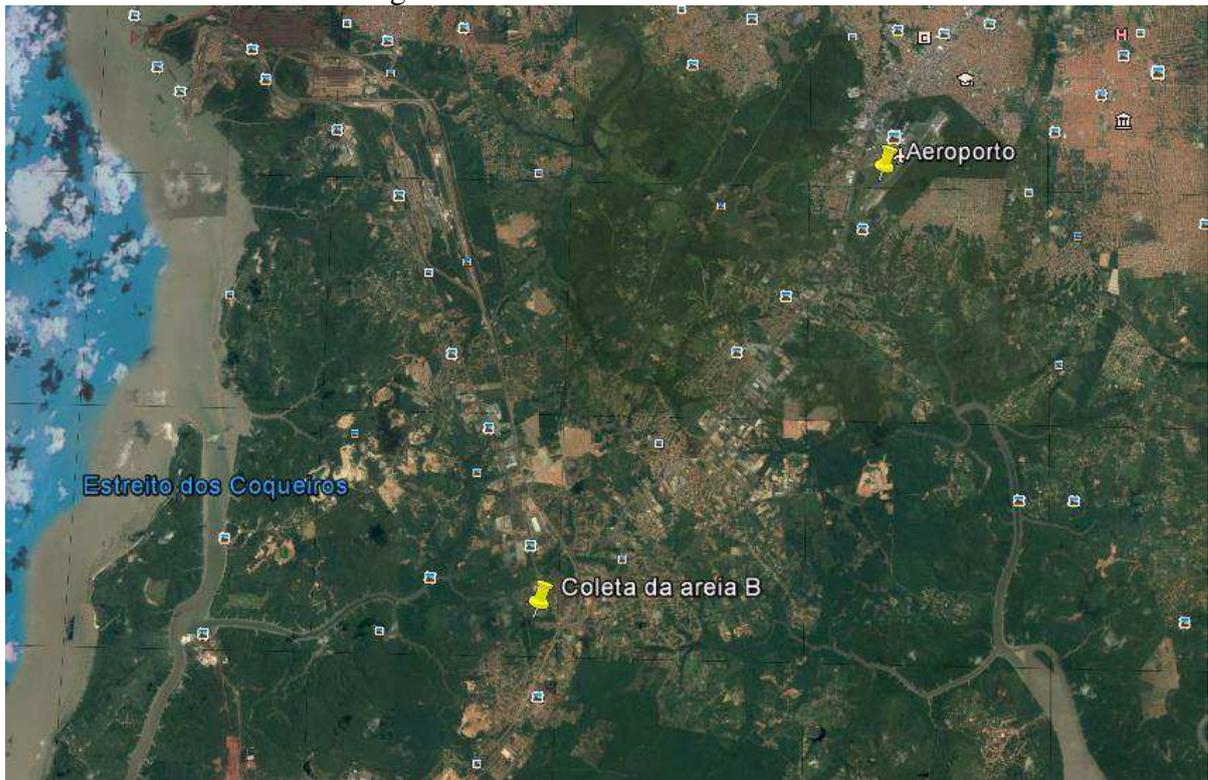
A areia B, observada na Figura 15, foi colhida na Vila Collier localizada no município de São Luís, de acordo com a Figura 16.

Figura 15 - Areia B



Fonte: Autora (2016)

Figura 16 - Local da coleta da areia B



Fonte: Google Earth (2016)

As amostras da areia A, Figura 17, e o CAP, Figura 18, foram cedidas pela Usina de Asfalto da SEMOSP (Secretária Municipal de Obras e Serviços Públicos de São Luís). Segundo a SEMOSP a areia cedida é de origem natural, lavada, proveniente de areal da região do Maracanã. O ligante utilizado no presente estudo trata-se do CAP 50/70, proveniente da LUBNOR localizada em Fortaleza.

Figura 17- Areia A



Fonte: Autora (2016)

Figura 18 - CAP 50/70



Fonte: Autora (2016)

A Usina de Asfalto da SEMOSP é localizada no município de São Luís, próximo ao Aeroporto Internacional Cunha Machado, conforme Figura 19.

Figura 19 - Localização da SEMOSP



Fonte: Google Earth (2016)

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos na presente pesquisa. Todos os ensaios realizados neste trabalho obedeceram às normas vigentes citadas anteriormente.

Os materiais foram submetidos à caracterização física, verificação do enquadramento granulométrico, dosagem Marshall, além das propriedades mecânicas das misturas asfálticas A e B, como estabilidade, desgaste Cântabro, resistência à tração por compressão diametral, adesividade pelo ensaio Lottman Modificado, Módulo de Resiliência e fadiga por compressão diametral. Por meio dos cinco últimos ensaios, buscou-se destacar diferenças entre as misturas A e B que pudessem evidenciar um mau desempenho, não atendendo, por exemplo, aos limites considerados mínimos.

#### **3.1 AREIA A**

Para a verificação das características da areia, que será utilizada de acordo com a norma e obter os parâmetros necessários, foram realizados os ensaios de equivalente de areia, granulometria, sendo dois tipos, a granulometria lavada e a granulometria a seco, índice de consistência (limite de liquidez e índice de plasticidade), teor de matéria orgânica e angularidade.

##### **3.1.1 Equivalente de Areia**

No ensaio de equivalente de areia, Figura 20, o material apresentou EA igual a 57%, valor este apresentado na Tabela 8, com o valor obtido observou-se que a areia utilizada está dentro dos padrões da norma DNER-ME 054-97, na qual o valor mínimo exigido é de 55%.

Figura 20 - Realização do ensaio de equivalente de areia na areia A



Fonte: Autora (2016)

Tabela 8 - Determinação do equivalente de areia da areia A

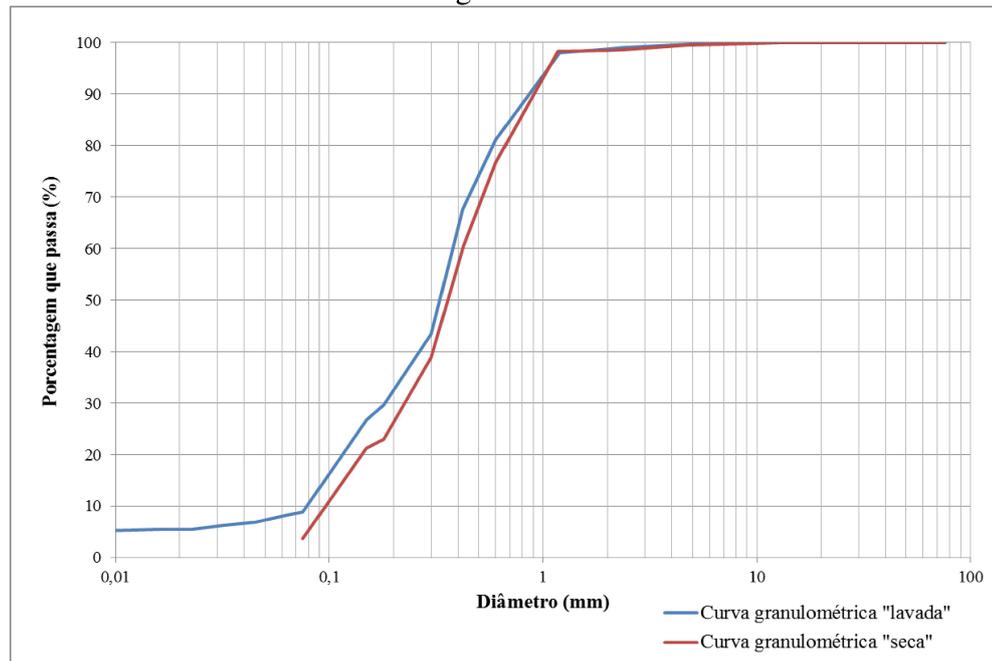
Nº AMOSTRA	Leitura no topo da argila (cm)	Leitura no topo da areia (cm)	EA parcial	EA final
1	16,9	9,8	58	
2	17,1	9,2	54	57
3	16,5	9,9	60	

Fonte: Autora (2016)

### 3.1.2 Granulometria

O ensaio de granulometria e sedimentação foram realizados e obteve-se a curva granulométrica do material. Na curva da granulometria lavada determinou-se que o material possui 1,18% de pedregulho acima de 2,0mm, 31,10% de areia grossa (2,0 a 0,42mm), 58,95% de areia fina (0,42 a 0,075mm) e 8,78% de material passado na peneira nº 200 (0,075mm), onde 4,76% são de argila coloidal (0,001mm). Na granulometria seca observar-se que o material possui 1,59% de pedregulho acima de 2,0mm, 37,85% de areia grossa (2,0 a 0,42mm), 56,84% de areia fina (0,42 a 0,075mm) e apenas 3,73% de material passado na peneira nº 200 (0,075mm). Vide o estudo, as curvas são apresentadas no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Curva granulométrica da areia A

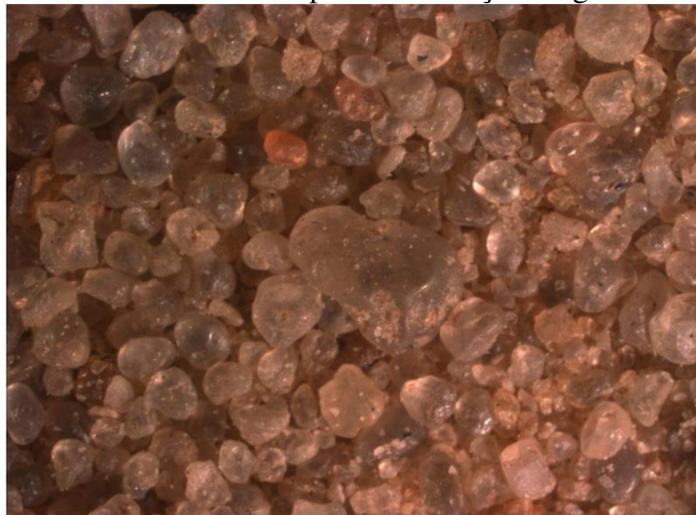


Fonte: Autora (2016)

Com as duas curvas granulométricas é possível observar que a granulometria lavada apresenta os resultados mais precisos para a análise correta da caracterização da areia utilizada.

Por existir uma grande diferença entre as granulometrias, realizou-se o procedimento de análise microscópica com uma ampliação de 80 vezes da areia A para os dois tipos de granulometria, que consiste na identificação da granulação do material (tamanho do grão) e a sua distribuição. Na Figura 21, pode-se observar a amostra, que é utilizada para a realização da granulometria seca, em que apresenta uma grande quantidade de materiais finos.

Figura 21 - Amostra da areia A utilizada para a realização da granulometria sem lavagem



Fonte: Autora (2016)

Já na Figura 22, é possível observar a amostra utilizada para a realização da granulometria lavada, e que diferente da Figura 21, os grãos apresentam certo brilho e transparência, portanto a quantidade de impurezas e de grãos finos nessa amostra é bem menor.

Figura 22 - Amostra da areia A utilizada para a realização da granulometria lavada



Fonte: Autora (2016)

Comparando as duas amostras utilizadas para a realização do ensaio de granulometria nota-se que a amostra que é lavada antes da realização do ensaio possui uma aparência mais limpa e livre de materiais finos com dimensões inferiores a 0,075mm.

### 3.1.3 Índices de Consistência

Os ensaios para obtenção dos índices de consistência foram realizados e nos resultados se observa que o material é NL/NP e apresenta IP nulo. Não foi possível obter os valores do limite de liquidez, pois não se conseguiu o fechamento da ranhura com mais de 25 golpes, Figura 23. E para o limite de plasticidade também não foi possível a sua determinação em virtude do tipo de material utilizado, areia, que é pouco plástica para a realização do ensaio.

Figura 23 - Realização dos ensaios de índice de consistência na Areia A



Fonte: Autora (2016)

### 3.1.4 Teor de Matéria Orgânica

A fim de complementar o estudo a respeito dos materiais indesejáveis que se encontram presentes nas areias e que podem exercer ação prejudicial sobre as misturas asfálticas foi realizado o ensaio de Teor de Matéria Orgânica (NBR 13600/96). O ensaio consiste na queima do material orgânico presente na amostra, em mufla, à temperatura de  $(440 \pm 5)^\circ\text{C}$ . A areia A apresentou MO (teor de matéria orgânica) igual a 0,13%, conforme Tabela 9.

Tabela 9 - Valores do ensaio de teor de matéria orgânica da areia A

Amostras	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>
Peso do candinho de porcelana (g)	577,24	183,35
Peso seco em estufa a $105^\circ\text{C}$ a $110^\circ\text{C}$ (g)	626,92	233,19
Peso seco em mufla a $440^\circ\text{C}$ (g)	626,87	233,11
Teor de materia orgânica MO (%)	0,1	0,16
MO (%)	0,13	

Fonte: Autora (2016)

Para as misturas asfálticas, em especial o AAUQ, não existe nenhum ensaio além do Equivalente de Areia para a determinação da quantidade de impurezas. A norma NBR 13600/96 não faz nenhuma referência em relação aos limites mínimos e máximos que um solo

deve ter para o teor de matéria orgânica. Porém existe a norma NBR 7211/2005 de agregados para concreto, em que determina que a quantidade de substâncias nocivas para os agregados miúdos não exceda 3%. Tomando esta norma como referência, a areia A está dentro do limite aceitável.

### 3.1.5 Angularidade do Agregado Fino

A angularidade do agregado fino (FAA) é avaliada através da determinação dos vazios não compactados e para o ensaio realizado, o resultado médio do volume de vazios não compactados da areia A apresentou valor de 42%, Tabela 10.

Tabela 10 - Valores do ensaio de FAA da areia A

Método	Vc (cm <sup>3</sup> )	ma (g)	$\rho_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	FAA (%)	FAA <sub>parcial</sub> (%)	FAA <sub>final</sub> (%)
A	103,696	172,99	2,6357	37	36	42
		176		36		
B	103,696	144,9	2,6357	47	46	
		148,54		46		
		148,99		45		
C	103,696	158,92	2,6357	42	42	

Fonte: Autora (2016)

O Superpave estabelece o valor de FAA mínimo de 40 para volume de tráfego médio, mas para volume de tráfego baixo não são estabelecidos valores mínimos, pois areias naturais menores que 40 são consideradas aceitáveis.

## 3.2 AREIA B

Assim como o material anterior, para a verificação das características da areia B e obter os parâmetros necessários para a caracterização física, foram realizados os ensaios de equivalente de areia, granulometria lavada, granulometria a seco e índice de consistência (limite de liquidez e índice de plasticidade).

### 3.2.1 Equivalente de Areia

Conforme a norma DNER-ME 054-97, a areia utilizada não se enquadra nas exigências, pois o valor mínimo exigido é de 55%, e o valor obtido em laboratório foi de apenas 27%, Figura 24.

Figura 24 - Realização do ensaio de equivalente de areia na areia B



Fonte: Autora (2016)

A Tabela 11 demonstra os valores das alturas de leituras no topo da argila e no topo da areia, e o respectivo valor do equivalente de areia em cada amostra ensaiada.

Tabela 11 - Determinação do equivalente de areia da areia B

Nº AMOSTRA	Leitura no topo da argila (cm)	Leitura no topo da areia (cm)	EA parcial	EA final
1	38	10,6	28	
2	38	9,7	26	27
3	38,7	9,9	26	

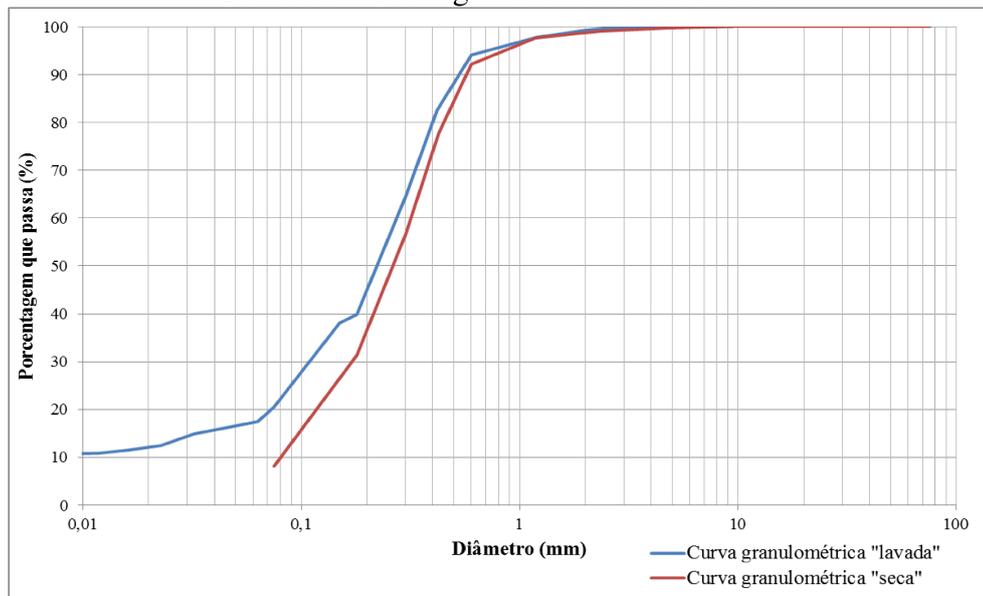
Fonte: Autora (2016)

### 3.2.2 Granulometria

A granulometria lavada foi realizada e o material apresentou 0,68% de pedregulho acima de 2,0mm, 16,85% de areia grossa (2,0 a 0,42mm), 62,00% de areia fina (0,42 a 0,075mm) e 20,47% de material passado na peneira nº 200 (0,075mm), onde 10,24% são de silte e 10,23% de argila.

A granulometria a seca do material apresentou 1,27% de pedregulho acima de 2,0mm, 20,99% de areia grossa (2,0 a 0,42mm), 69,20% de areia fina (0,42 a 0,075mm) e 8,54% de material passado na peneira n° 200 (0,075mm). As curvas granulométricas lavada e seca são representadas no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Curva granulométrica da areia B



Fonte: Autora (2016)

Do mesmo modo visto no material anterior, a curva granulométrica que melhor representou as características do material foi novamente a lavada, pois nesta granulometria os grãos maiores não ficam envolvidos pelas partículas finas.

A análise microscópica da areia B, ampliação de 80 vezes, também foi realizada para verificar se assim como a areia A, as amostras apresentaram diferenças visuais nos dois tipos de granulometrias realizadas. Na Figura 25, pode-se observar a amostra que é empregada para a realização da granulometria seca, em que apresenta uma grande quantidade de materiais finos.

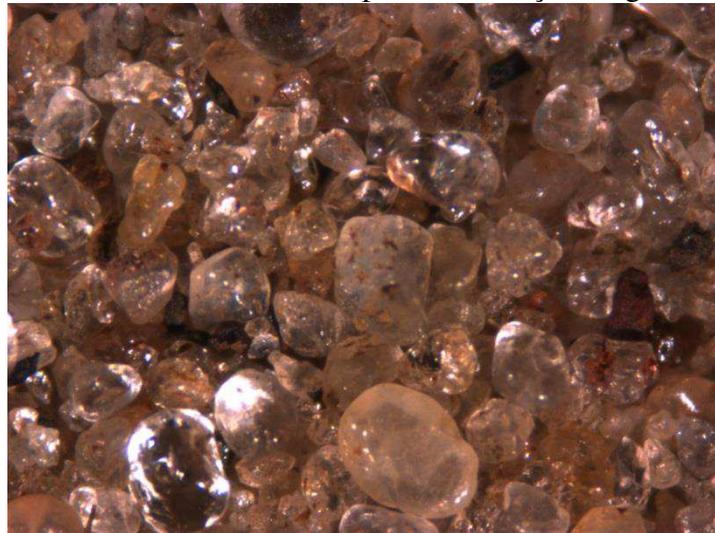
Figura 25 - Amostra da areia B utilizada para a realização da granulometria sem lavagem



Fonte: Autora (2016)

A Figura 26 apresenta a amostra empregada para a realização do ensaio de granulometria lavada onde os grãos possuem certo brilho e transparência, portanto a quantidade de impurezas e de grãos finos nessa amostra é bem menor que na amostra anterior.

Figura 26 - Amostra da areia B utilizada para a realização da granulometria lavada



Fonte: Autora (2016)

Comparando as duas amostras da areia B empregadas para a realização dos ensaios de granulometria a amostra lavada antes da realização do ensaio possui a aparência mais limpa e brilhosa, portanto livre de materiais finos com dimensões inferiores a 0,075mm.

### 3.2.3 Índices de Consistência

Assim como a areia A, não foi possível obter os valores do limite de liquidez, pois não se conseguiu mais de 25 golpes para o fechamento da ranhura, e no limite de plasticidade em virtude do tipo de material utilizado, areia, que é pouco plástica, não se obteve resultados substanciais, Figura 27.

Figura 27- Realização dos ensaios de índice de consistência na Areia B



Fonte: Autora (2016)

### 3.2.4 Teor de Matéria Orgânica

De acordo com o ensaio de Teor de Matéria Orgânica, foram ensaiadas duas amostras onde a areia B apresentou MO de 2,22%, valor este superior ao apresentado pela areia A. Os valores obtidos no ensaio são apresentados na Tabela 12, onde o resultado final é a média dos resultados das duas amostras ensaiadas.

Tabela 12 - Valores do ensaio de teor de matéria orgânica da areia B

Amostras	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>
Peso do candinho de porcelana (g)	586,68	322,84
Peso seco em estufa a 105°C a 110°C (g)	636,22	372,88
Peso seco em mufla a 440°C (g)	635,17	371,72
Teor de matéria orgânica MO (%)	2,12	2,32
MO (%)	2,22	

Fonte: Autora (2016)

De acordo com a norma NBR 7211/2005 de agregados para concreto em que a quantidade de substâncias nocivas não deve exceder 3%, a areia B ainda está dentro do limite aceitável pela norma. Portanto, não trazendo nenhum prejuízo à aderência da mistura asfáltica pela elevada quantidade de materiais nocivos.

### 3.2.5 Angularidade do Agregado Fino

No ensaio de angularidade do agregado fino (FAA) a areia B apresentou o valor do resultado médio do volume de vazios não compactados de 52%, conforme Tabela 13, valor este superior ao mínimo aceitável pela Superpave para agregados miúdos serem utilizados em pavimentos com tráfego alto.

Tabela 13 - Valores do ensaio de FAA da areia B

Método	Vc (cm <sup>3</sup> )	ma (g)	$\rho_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	FAA (%)	FAA <sub>parcial</sub> (%)	FAA <sub>final</sub> (%)
A	103,696	131,01	2,6357	52	52	52
		131,21		52		
B	103,696	136,51	2,6357	50	52	
		137,51		50		
		123,31		55		
C	103,696	145,51	2,6357	47	47	

Fonte: Autora (2016)

## 3.3 CAP

As propriedades físicas dos cimentos asfálticos estão associadas à sua temperatura, e para a sua especificação como adequado para a pavimentação é necessário que possua algumas características principais, obtidos através dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade.

### 3.3.1 Penetração

No ensaio de penetração os valores obtidos foram 55mm, 53,5mm e 53mm atingindo uma média de penetração de 53,8mm. Estes estão de acordo com a norma DNER-ME 003/99 que determina que o CAP 50-70 deve ter penetração entre 50 a 70, ensaio realizado conforme a Figura 28.

Figura 28 - Ensaio de penetração



Fonte: Autora (2016)

### 3.3.2 Ponto de Amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento obteve a temperatura de 46°C nas duas amostras no instante em que a mistura amolecida toca a placa do fundo do conjunto padrão de ensaio. Portanto, as duas amostras não excederam 1°C na diferença de temperatura e o limite mínimo determinado pela norma NBR 6560/2008 é de 46°C, na Figura 29 é mostrado a execução do ensaio.

Figura 29 - Ensaio de ponto de amolecimento

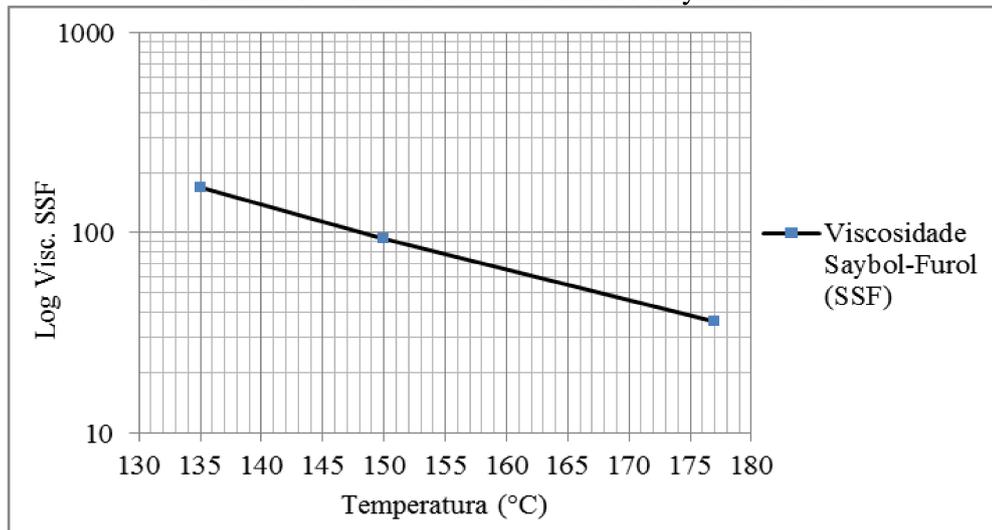


Fonte: Autora (2016)

### 3.3.3 Viscosidade de Saybolt-Furol

A resistência de fluxo do CAP é medida através do ensaio de viscosidade. Além de especificar o material utilizado, o ensaio de viscosidade determina a consistência adequada que ele deve apresentar na mistura para proporcionar uma melhor cobertura dos agregados. No ensaio realizado de Viscosidade de Saybolt-Furol, o CAP apresentou na temperatura de 135°C um tempo de 167 segundos, na temperatura de 150°C, 93 segundos e na temperatura de 177°C um tempo de 36 segundos. Todos os valores obtidos estão de acordo com os limites determinados pela NBR 14950. Com a relação entre as temperaturas e a viscosidade em segundos obteve-se o a curva da viscosidade de Saybolt-Furol, conforme o Gráfico 3.

Gráfico 3 - Gráfico da Viscosidade Saybol-Furol



Fonte: Autora (2016)

De acordo com o gráfico determinou-se a temperatura de compactação da mistura, 140°C, a temperatura do CAP, 155°C e a temperatura do agregado na mistura, 170°C, conforme a Tabela 14.

Tabela 14 - Temperaturas da mistura, do CAP e do agregado

Limites	Temperatura de compactação (°C)	Temperatura do CAP (°C)	Temperatura do agregado (°C)
mínimo	138	150	165
máximo	144	157	170
ADOTADO	140	155	170

Fonte: Autora (2016)

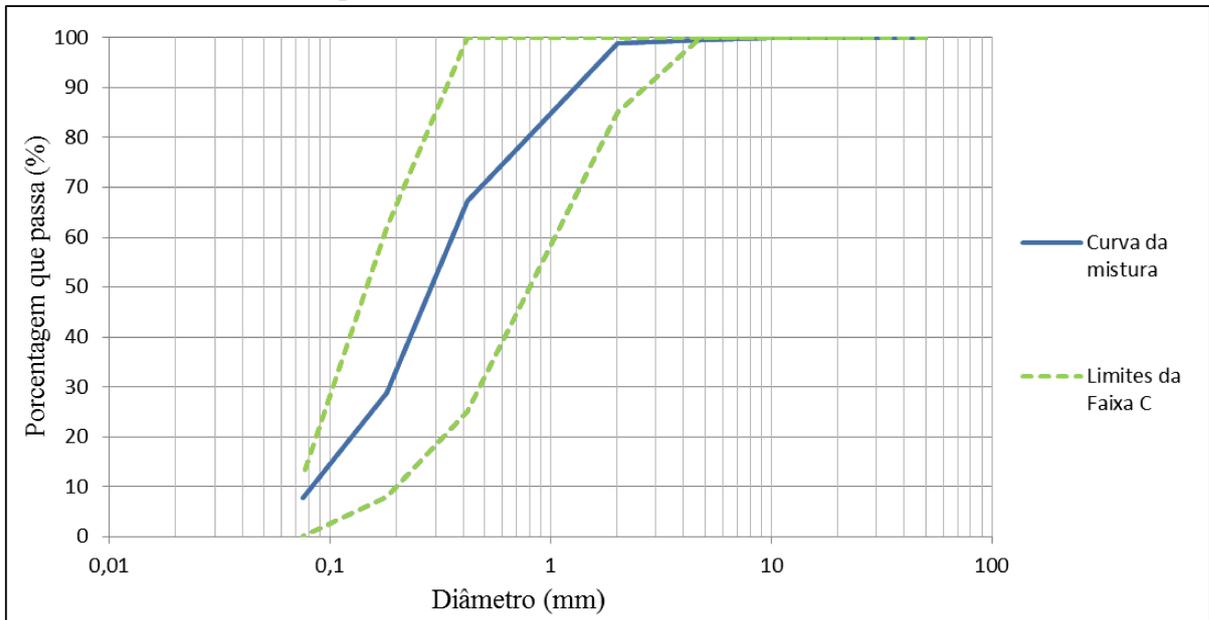
### 3.4 MISTURA ASFÁLTICA

A metodologia idealizada para o desenvolvimento desta pesquisa contemplou a dosagem das misturas asfálticas, preparação de amostras para ensaios mecânicos e uma análise racional dos resultados obtidos.

#### 3.4.1 Dosagem e Estabilidade Marshall

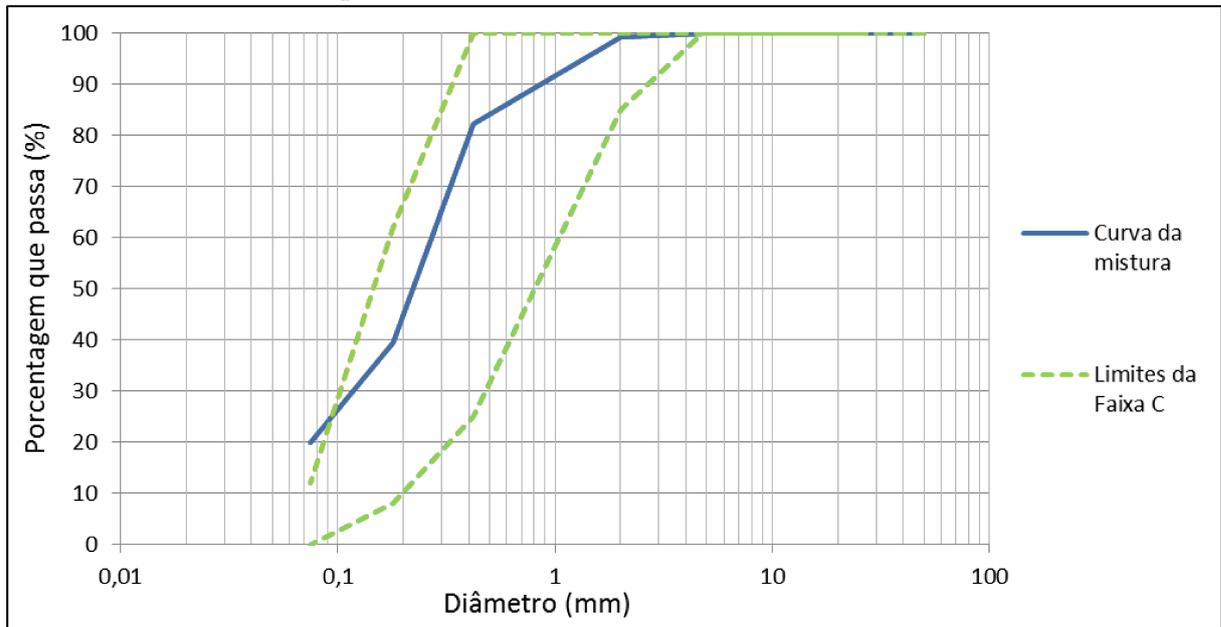
A partir do ensaio de granulometria realizado foram elaboradas as curvas granulométricas dos materiais (areia A e areia B) e optou-se por utilizar a granulometria lavada para realização da dosagem Marshall. Não foi possível enquadrar a areia B nas faixas do DNIT, sendo necessária a utilização da Norma DERT-ES-P 14/00 para o enquadramento e, portanto adotado a faixa C da referida norma. O Gráfico 4 ilustra a curva granulométrica da areia A com o enquadramento na faixa C e o Gráfico 5 a curva granulométrica da areia B com o seu respectivo enquadramento na faixa adotada.

Gráfico 4 - Enquadramento da areia A na faixa C do DERT-ES-P 14/00



Fonte: Autora (2016)

Gráfico 5 - Enquadramento da areia B na faixa C do DERT-ES-P 14/00



Fonte: Autora (2016)

Nota-se que apesar da areia B apresentar seus finos passantes na peneira nº 200 acima do que estabelecido pela norma, não foi realizada nenhuma mistura de material, possibilitando a análise das misturas contendo 100% dos agregados em análise.

Para a realização da dosagem, utilizando-se a metodologia Marshall, faz-se necessário o conhecimento da densidade real do agregado. O ensaio foi norteado pelas normas DNER – ME 084/95, que determina o ensaio para o agregado miúdo, agregado que passa pela peneira ABNT 4,8 mm e fica retido na peneira ABNT 0,075mm. A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 15 - Densidade do agregado miúdo

Densidade Real (kN/m <sup>3</sup> )	
Areia A	26,36
Areia B	25,90

Fonte: Autora (2016)

Com base nas curvas granulométricas das areias são determinados os traços para a realização do Ensaio Marshall. Adota-se 5 teores de asfalto para diferentes grupos de corpo de prova (CPs) a serem moldados, a partir dos quais determina-se o teor ótimo de projeto para as misturas de AAUQ.

De acordo com a metodologia Marshall, foram preparados CPs com porcentagem de CAP de 7%, 7,5%, 8%, 8,5% e 9% para as duas areias em estudo. Para cada teor nos dois tipos de areia, são determinados a densidade teórica (DMT), a densidade aparente (Dap), a

porcentagem de vazios (Vv), os vazios cheios de betume (VCB), os vazios de agregado mineral (VAM) e a relação betume-vazios (RBV), conforme a Tabela 16 para a areia A e Tabela 17 para a areia B.

Tabela 16 - Variação dos parâmetros de norma em função do CAP para a mistura com a areia A

% de CAP	Dap. (Kg/m <sup>3</sup> )	DMT (Kg/m <sup>3</sup> )	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	Fluência (mm)	Estabilidade (N)
7	2187	2376	7,98	14,86	22,84	65,08	4,25	1116,6
7,5	2198	2360	6,88	16,03	22,88	69,94	4,00	1143,9
8	2200	2343	6,11	17,09	23,20	73,66	4,00	1324,9
8,5	2207	2327	5,16	18,21	23,37	77,92	4,50	1636,8
9	2201	2311	4,78	19,23	24,00	80,11	4,00	1503,0

Fonte: Autora (2016)

Tabela 17 - Variação dos parâmetros de norma em função do CAP para a mistura com a areia B

% de CAP	Dap. (Kg/m <sup>3</sup> )	DMT (Kg/m <sup>3</sup> )	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	Fluência (mm)	Estabilidade (N)
7	2184	2342	6,75	14,84	21,59	68,75	5,30	3743,5
7,5	2177	2326	6,42	15,85	22,27	71,17	4,75	3183,0
8	2196	2310	5,22	17,06	21,98	77,66	5,50	4151,2
8,5	2185	2295	4,78	18,03	22,81	79,07	5,75	3893,1
9	2178	2279	4,42	19,03	23,45	81,15	5,00	3780,7

Fonte: Autora (2016)

De acordo com as Tabelas 16 e 17, os dois tipos de misturas apresentaram valores de densidade aparente (Dap) bem próximos, em que os maiores valores para a densidade aparente são nas misturas com os teores próximos de 8% de CAP, tanto para a mistura com areia A, quanto para a mistura com areia B. O parâmetro da densidade máxima teórica (DMT) diminui à medida que os valores de CAP são aumentados, isso ocorre nos dois tipos de misturas. O DMT é um dos parâmetros utilizado para o cálculo do volume de vazios e teor de asfalto efetivo da mistura asfáltica.

O volume de vazios estabelecido pela DERT – ES – P 14/00 é de 3% o mínimo e 8% o valor máximo, portanto as duas misturas apresentaram valores de volume de vazios dentro dos parâmetros em todos os teores de CAP ensaiados. Enquanto que o volume de vazios diminui à medida que os teores de CAP são elevados, os vazios preenchidos com betume aumentam, pois os vazios de ar são preenchidos pelo aumento do percentual de CAP.

O parâmetro de vazios do agregado mineral (VAM) é a soma dos vazios não preenchidos (Vv) com os vazios preenchidos por betume (VCB), ou seja, é o volume total de vazios da mistura, portanto apesar do Vv diminuir a medida que a porcentagem de CAP

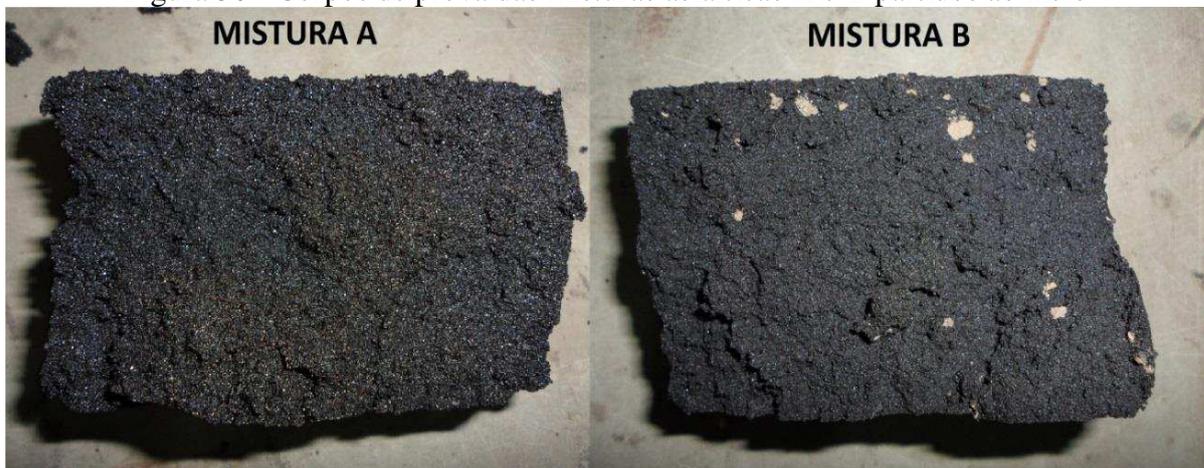
aumenta, o VCB aumenta, resultando em um VAM maior quando ocorre o acréscimo da quantidade de CAP nas misturas.

A norma DERT – ES – P 14/00 estabelece que a relação betume e vazios esteja entre 65% e 82%, os valores de RBV em todos os teores de CAP das duas misturas asfálticas ficaram dentro desses limites, portanto o parâmetro do RBV satisfatório. Porém na fluência, em todos os teores da mistura com areia B os valores não foram satisfatórios, já que o valor máximo estabelecido por norma é de 4mm, enquanto que a mistura com a utilização da areia A, ficou fora do limite apenas nos teores de 7% e de 8,5% de CAP, os outros teores apresentaram valor de fluência igual a 4mm. Estes resultados de fluência representam uma flexibilidade acima do permitido, já que a fluência é a deformação que o corpo de prova sofre quando rompe no ensaio de Estabilidade Marshall.

Na Tabela 16 observa-se o resultado de Estabilidade Marshall para a mistura com areia A abaixo do que determina a norma DNIT 032/2005 – ES para todos os teores ensaiados. Ou seja, mesmo dentro dos parâmetros do ensaio de equivalente de areia, a areia não confere à mistura uma rigidez satisfatória, se medida pelo parâmetro do ensaio Marshall.

Enquanto que a Tabela 17 mostra que o parâmetro Estabilidade Marshall foi atendido para todos os teores. Supõe-se que pela grande porcentagem de finos contidos na areia, durante a mistura asfalto-agregado as partículas maiores foram envolvidas pelas menores, formando grumos, que aquecidos enrijeceram e foram envolvidos com CAP, conferindo-lhes certa impermeabilidade. Desta forma, quando submetidos ao ensaio de estabilidade apresentam resultados adequados, frente às indicações de norma. Na Figura 30 podemos observar a diferença dentro das misturas asfálticas A e B, onde na mistura B é possível notar a formação dos grumos.

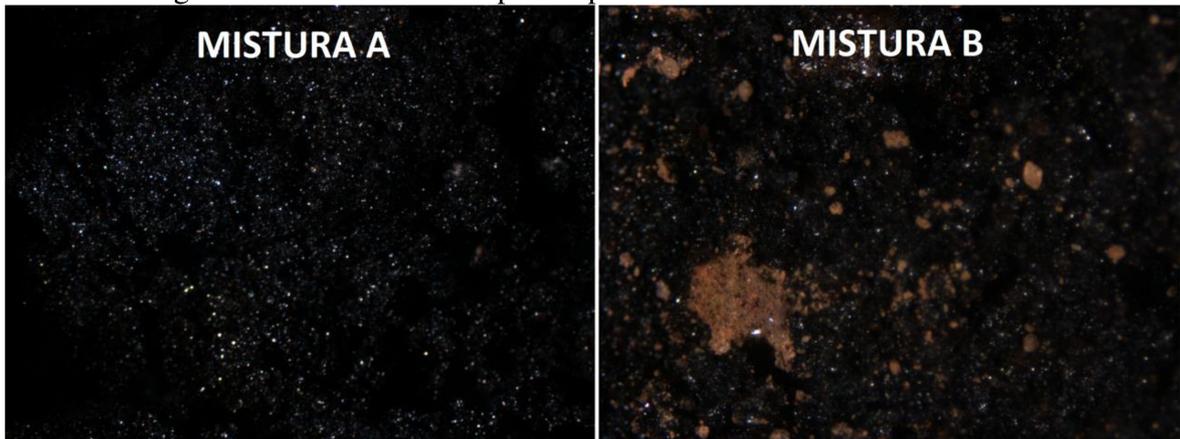
Figura 30 - Corpos de prova das misturas asfálticas A e B partidos ao meio



Fonte: Autora (2016)

A Figura 31, também apresenta o interior dos corpos de prova das misturas asfálticas A e B, onde foi fotografada a partir de uma lupa com ampliação de 80 vezes para que fosse possível observar de forma mais aproximada à formação ou não dos grumos no interior das misturas.

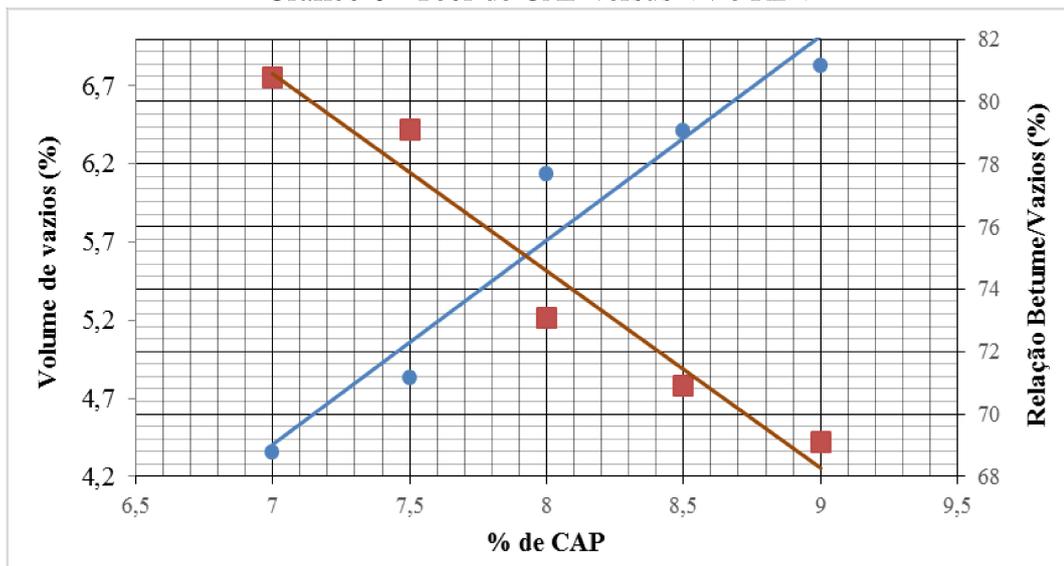
Figura 31 - Interior dos corpos de prova das misturas asfálticas A e B



Fonte: Autora (2016)

Para o método de obtenção do teor ótimo de CAP adotado para as misturas dos dois tipos de areia utilizou-se os parâmetros volumétricos de volume de vazios (Vv%) e a relação betume-vazios (RBV%), conforme o Gráfico 6.

Gráfico 6 - Teor de CAP versus Vv e RBV



Fonte: Autora (2016)

A partir dos dados apresentados nas Tabelas 16 e 17, e aplicando-se a metodologia de obtenção do teor ótimo de ligante a partir do Vv (%) e do RBV (%), obteve-se o teor de ligante igual a 8% para a mistura com areia A e 7,7% para a mistura com areia B. Com esses

teores de CAP moldaram-se novos corpos-de-prova e as misturas de AAUQ apresentaram as propriedades apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Propriedades das misturas de AAUQ

	Dap. (g/cm <sup>3</sup> )	DMT (g/cm <sup>3</sup> )	Vv (%)	RBV (%)	Fluência (mm)
AAUQ Areia A	2,200	2,343	6,18	73,34	5,75
AAUQ Areia B	2,184	2,320	5,9	73,6	6
Requisitos de norma	-	-	3 a 8	65 a 82	2,0 a 4,5

Fonte: Autora (2016)

As duas misturas estudadas apresentaram valor de fluência acima do permitido pela norma DNIT 032/2005 – ES, demonstrando que estão mais flexíveis do que o recomendado para este tipo de mistura, podendo apresentar deformações excessivas na sua estrutura. Comparando os dois valores de fluência das misturas, a mistura com areia B apresentou um valor mais elevado que a mistura com areia A, portanto a areia B proporciona a estrutura do pavimento uma flexibilidade mais elevada.

Também com os novos corpos de prova, no teor ótimo de CAP foram analisadas algumas propriedades mecânicas das misturas como: estabilidade Marshall, desgaste Cântabro e resistência à tração por compressão diametral (RTCD).

A Estabilidade Marshall dos CPs no teor ótimo de CAP apresentou a mesma variação que ocorreu nos CPs testados anteriormente. A mistura utilizando a areia A apresentou estabilidade de 1582,79 N, valor este que se apresenta insatisfatório junto à norma. Enquanto que a mistura com a areia B obteve valor satisfatório de 3665,73 N.

### 3.4.2 Desgaste Cântabro

As misturas asfálticas A e B também foram submetidas ao ensaio Cântabro para que fosse analisado o seu desgaste. As misturas apresentaram comportamento satisfatório, pois a mistura com a areia A obteve 1% de desgaste e a mistura com a areia B 2% de desgaste. Estes valores se encontram distantes do valor máximo determinado pelo DNIT, de 25% para misturas de camada porosa de atrito (CPA), tomada como referência apesar de não ser uma mistura densa. O desgaste ocorrido nas misturas pode ser observado conforme a Figura 32.

Figura 32 - CPs das misturas A e B após a realização do ensaio de Cântabro



Fonte: Autora (2016)

Apesar dos valores de desgaste se apresentar bem distantes do máximo permitido, se comparado os dois tipos de mistura, observa-se que mistura com areia A resultou em um desgaste um pouco menor que a mistura com areia B, com diferença de 1% entre ambas.

### 3.4.3 Resistência a Tração por Compressão Diametral

O ensaio de RTCD apresentou valores pouco expressivos, pois as duas misturas obtiveram valores um pouco abaixo do mínimo exigido pelo DNIT para misturas de pavimentos flexíveis (0,65MPa), de acordo com a norma DNER ME 138/94. Na Tabela 19 são representados os valores resultantes do ensaio de RTCD.

Tabela 19 - Resistência a Tração por Compressão Diametral

	Areia A			Areia B		
n° corpo do prova	1	2	3	1	2	3
Carga de ruptura, kgf	723	629	557	561	556	599
Diâmetro do corpo de prova, mm	10,043	10,122	10,141	10,091	10,116	10,103
Altura do corpo de prova, mm	6,613	6,6	6,594	6,549	6,622	6,618
Resistência a tração, MPa	0,693	0,599	0,530	0,540	0,528	0,570
Resistência a tração média, MPa	0,599			0,540		

Fonte: Autora (2016)

Assim como no desgaste de Cântabro, a mistura com areia A apresentou resultados um pouco melhores que a mistura com areia B, com uma diferença de apenas 0,059MPa entre os valores da resistência a tração por compressão diametral.

#### 3.4.4 Módulo de Resiliência

A determinação do módulo de resiliência foi realizada na Universidade Federal do Ceará (UFC) através do método de ensaio DNER-ME 133/94, a Figura 33 ilustra o equipamento utilizado.

Figura 33 - Equipamento utilizado para a realização do ensaio de MR



Fonte: Autora (2016)

Os CPs utilizados para o ensaio foram moldados de acordo com os procedimentos do método Marshall, tendo como teores aqueles determinados como os de projeto, sendo 8% de CAP para a mistura com areia A e 7,7% de CAP para a mistura com areia B.

Foi posicionado o corpo de prova no interior do suporte de fixação do transdutor LVDT, sobre a base da estrutura de suporte, entre os dois cabeçotes curvos. Os LVDT são fixados e ajustados de modo a se obter o registro no computador, Figura 34.

Figura 34 - Realização do ensaio de MR



Fonte: Autora (2016)

Os ensaios de Módulo de Resiliência foram realizados utilizando a aparelhagem do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará.

Para cada mistura foram moldados e ensaiados 3 corpos de prova cilíndricos e durante a realização do ensaio foi mantida a temperatura de 25°C, temperatura está controlada, conforme Figura 35.

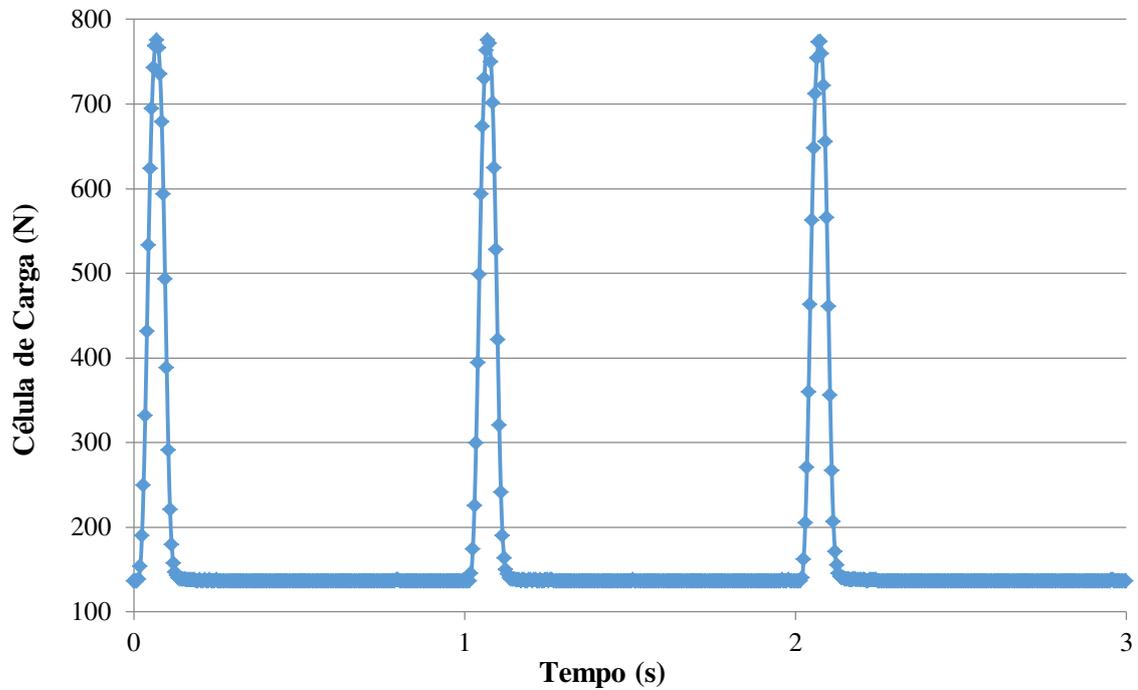
Figura 35 - Controle da temperatura durante a realização do ensaio de MR



Fonte: Autora (2016)

As cargas senoidais repetidas aplicadas ao corpo de prova são representadas pelo gráfico célula de carga x tempo, Gráfico 7, onde a duração do pulso é de 0,1s e 0,9s de repouso apenas com aplicação de pressão de contato.

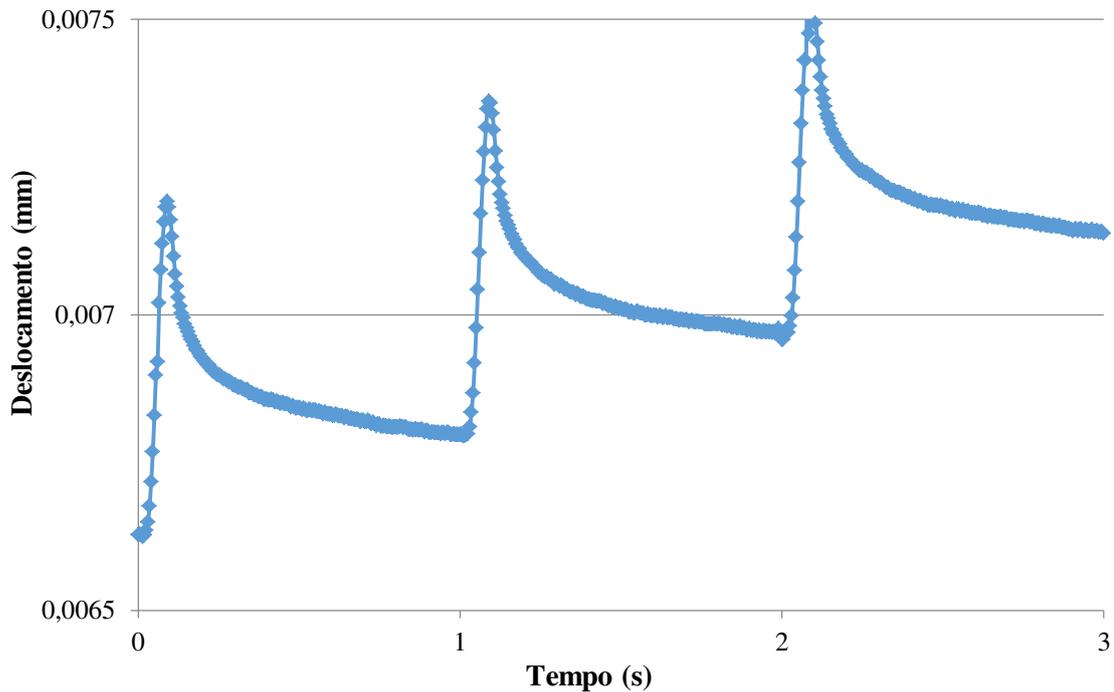
Gráfico 7 – Aplicação de carga repetida no ensaio de MR



Fonte: Autora (2016)

No Gráfico 8 são representados os deslocamentos horizontais que ocorrem no corpo de prova em função do tempo, onde a duração do pulso é de 0,1s e 0,9s de repouso apenas com aplicação de pressão de contato.

Gráfico 8 - Deslocamentos horizontais que ocorrem no ensaio de MR



Fonte: Autora (2016)

Na Tabela 20, encontram-se os resultados dos ensaios de módulo de resiliência, sendo que, para o cálculo foi considerado o valor do coeficiente de *Poisson* igual a 0,30.

Tabela 20 - Resultado dos ensaios de módulo de resiliência

	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	MR (MPa)	MR médio (MPa)
Areia A	10,149	6,799	1376	1671
	10,123	6,762	1701	
	10,135	6,777	1671	
Areia B	10,132	6,798	2683	2683
	10,143	6,711	2727	
	10,152	6,664	2245	

Fonte: Autora (2016)

A areia A, apresentou MR de 1671MPa, enquanto a areia B obteve MR de 2683MPa, valor este superior ao obtido na areia A. Portanto, a mistura com uma maior quantidade de material fino na sua composição apresentou módulo de resiliência superior ao da mistura na qual se utilizada areia com especificação dentro do ensaio de EA. Esse valor mais elevado da mistura com areia B proporciona uma maior rigidez à mistura e uma menor deformação.

### 2.4.5 Vida de Fadiga

O ensaio de vida de fadiga, assim como o MR, também foi realizado na Universidade Federal do Ceará – UFC. Como já mencionado anteriormente, a vida de fadiga é determinada através do ensaio de compressão diametral por tensão controlada, ensaio que pode ser realizado no mesmo equipamento de MR, ilustrado anteriormente na Figura 39.

Este ensaio possui a grande vantagem de permitir a obtenção de CPs de forma rápida e simples, pois são utilizadas as dimensões dos CPs Marshall, além da rapidez e simplicidade na execução do ensaio.

Inicialmente é necessário obter a resistência à tração por compressão diametral, RT, para servir como parâmetro para os níveis de tensão que serão aplicados durante o ensaio, ensaio este já realizado e citado anteriormente. A mistura com areia A a resistência a tração apresentou valor de 0,599MPa e a mistura com areia B 0,54MPa.

Para a realização do ensaio de vida de fadiga, foram moldados 10 corpos de prova para cada mistura. Os CPs foram submetidos ao ensaio de fadiga por compressão diametral sob 5 diferentes níveis de tensão, sendo que para cada nível foram realizadas duas réplicas. Estes níveis de tensão corresponderam a 50%, 40%, 30%, 20% e 10% da carga de ruptura estática à tração, previamente determinada.

O ensaio foi executado a 25°C, sob tensão controlada, portanto, a aplicação de carga cíclica foi constante durante toda a realização do ensaio. O término do ensaio foi determinado quando a deformação vertical de cada corpo de prova atingisse 4mm ou com a ruptura completa do mesmo, e então, neste momento, registrou-se o número de aplicações efetuadas.

Para cada mistura foram ensaiados dez CPs com a carga alvo variando de 50% a 10% da carga do ensaio de RTCD, onde a carga alvo para a mistura com areia A variou de 3223N a 636N e de 2887N a 550N para a mistura com areia B. Essa variação de carga no ensaio proporcionou uma diferença de tensões no centro do corpo de prova ( $\Delta\sigma$ ) de 0,12 a 0,6MPa para as misturas com areia A, e as misturas com areia B apresentaram uma variação da tensão de 0,1 a 0,54MPa. Portanto, os valores de variação da carga alvo e da tensão das duas areias são valores bem próximos, praticamente idênticos.

Na Tabela 20, são apresentados os resultados obtidos no ensaio de vida de fadiga, em relação a cada nível de tensão aplicada. O Gráfico 9 apresenta as curvas de fadiga das misturas com a areia A e B. A partir das curvas de vida de fadiga nota-se que a mistura com

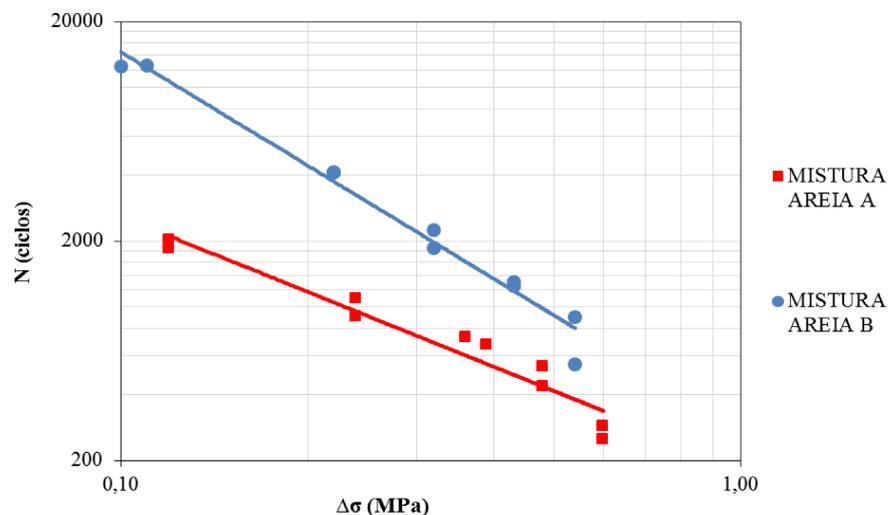
areia B apresentou comportamento bem superior que a mistura com areia A, sinalizando que a areia B é mais resistente à fadiga.

Tabela 21 - Resultados do ensaio de vida de fadiga por compressão diametral

	% RT	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Carga alvo (N)	$\Delta\sigma$ (MPa)	Nº ciclos
Areia A	50	10,125	6,77	3223	0,6	247
	50	10,122	6,74	3210	0,6	285
	40	10,095	6,79	2578	0,48	434
	40	10,083	6,784	2573	0,48	532
	30	10,064	6,77	1922	0,36	725
	30	10,094	6,76	2086	0,39	668
	20	10,150	6,80	1298	0,24	900
	20	10,123	6,76	1284	0,24	1082
	10	10,135	6,78	646	0,12	1831
	10	10,043	6,74	636	0,12	2012
Areia B	50	10,154	6,706	2887	0,54	550
	50	10,117	6,681	2866	0,54	903
	40	10,133	6,65	2286	0,43	1297
	40	10,167	6,78	2339	0,43	1249
	30	10,140	6,75	1741	0,32	1854
	30	10,180	6,66	1723	0,32	2240
	20	10,146	6,77	1164	0,22	4090
	20	10,143	6,71	1154	0,22	4122
	10	10,152	6,66	573	0,11	12553
	10	10,132	6,798	550	0,1	12440

Fonte: Autora (2016)

Gráfico 9 - Curvas da vida de fadiga em função da diferença de tensão



Fonte: Autora (2016)

A vida de fadiga pode também ser representada pela deformação resiliente, um parâmetro calculado que pondera a interferência do módulo de resiliência da mistura. Os resultados das deformações resilientes são dados na Tabela 22, em que a mistura asfáltica com areia A possui uma deformação maior que a mistura utilizando areia B.

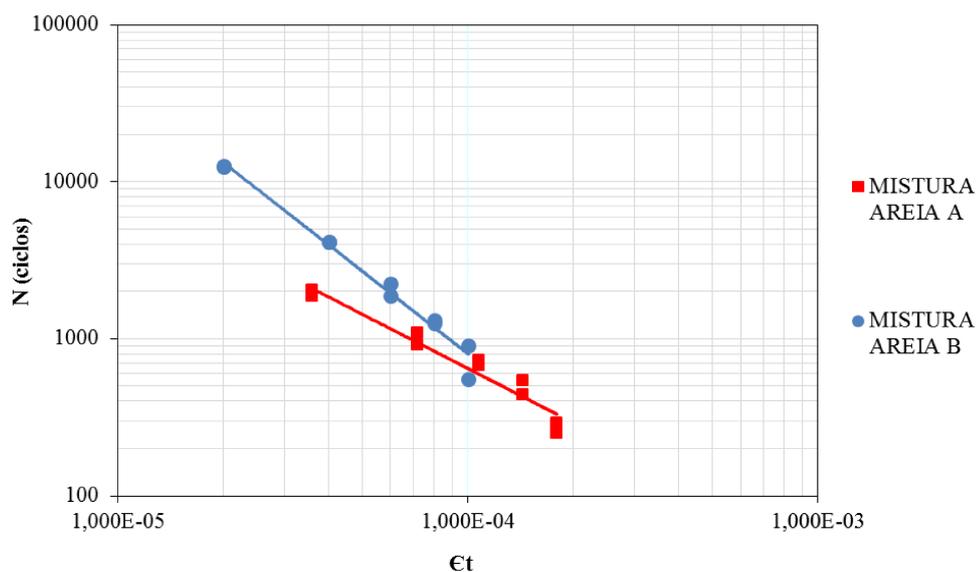
Tabela 22 - Deformação resiliente das misturas asfálticas

	% RT	RT (MPa)	MR (MPa)	Nº ciclos	Et
Areia A	50	0,599	1671	266	1,792E-04
	40			483	1,434E-04
	30			697	1,075E-04
	20			991	7,169E-05
	10			1922	3,585E-05
Areia B	50	0,54	2683	727	1,006E-04
	40			1273	8,051E-05
	30			2047	6,038E-05
	20			4106	4,025E-05
	10			12497	2,013E-05

Fonte: Autora (2016)

A partir dos valores das deformações resilientes observa-se que a mistura com areia B possui uma menor deformação de 43,85% em todos os níveis de aplicações de tensão, em relação à mistura asfáltica utilizando areia A. O Gráfico 10, ilustra as curvas de deformação resiliente em função do número de aplicações de cargas no ensaio.

Gráfico 10 - Curvas de vida de fadiga em função da deformação resiliente das misturas



Fonte: Autora (2016)

A partir da elaboração das curvas de fadiga das misturas desenvolveram-se os modelos de fadiga obtidos em função da diferença de tensão e em função da deformação resiliente calculada das areias utilizadas, modelos estes expressos na Tabela 23.

Tabela 23 - Modelos de fadiga

Modelo de Fadiga		
	Em função da diferença de tensão	Em função da deformação resiliente
Areia A	$N = 1,8815 \times 10^2 (1/\Delta\sigma)^{1,137}$	$N = 9 \times 10^{-5} (1/\epsilon_t)^{1,743}$
Areia B	$N = 2,7806 \times 10^2 (1/\Delta\sigma)^{1,718}$	$N = 1,69 \times 10^{-2} (1/\epsilon_t)^{1,146}$

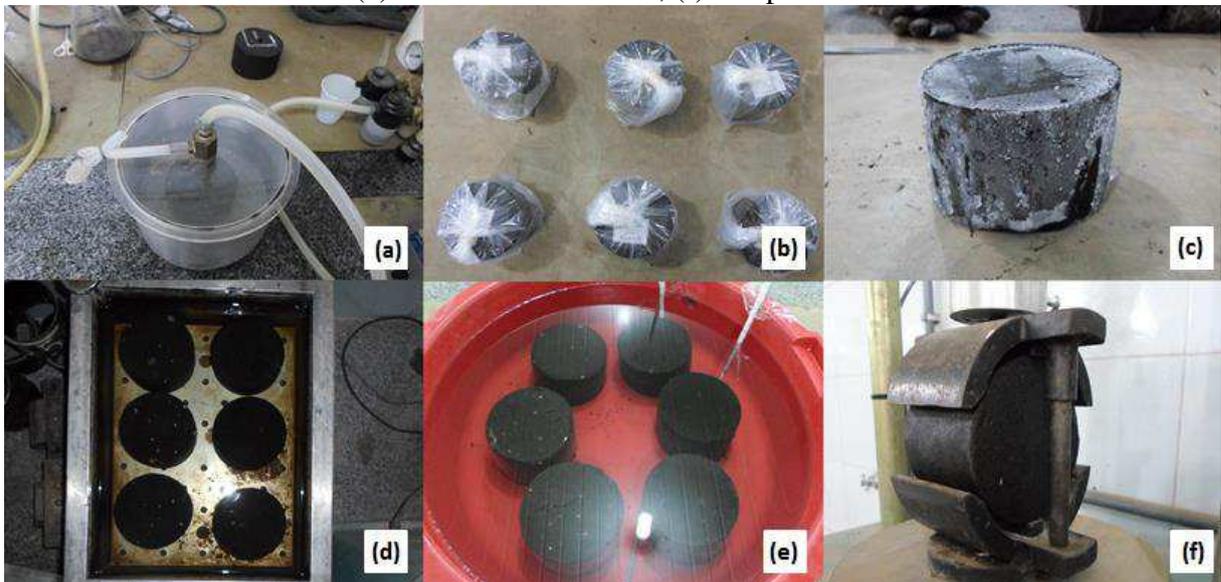
Fonte: Autora (2016)

De um modo geral verifica-se na Figura 45 que para um nível menor de deformações a mistura B possui maior vida de fadiga.

#### 2.4.6 Adesividade (Lottman Modificado)

Visto que as propriedades analisadas não apontaram uma vantagem à mistura A, como esperado, apontando ainda uma estabilidade Marshall bem abaixo do limite inferior exigido, verificou-se a adesividade ligante-agregado por meio do ensaio normatizado pela AASHTO T 283. Apesar da norma se destinar às misturas de concreto asfáltico, trabalhou-se com um volume de vazios para os ensaios, na ordem de 7,5%, isto com apenas 20 golpes de cada lado do corpo-de-prova, na compactação Marshall. A Figura 36 mostra as etapas do ensaio para a comparação dos CPs que foram submetidos ao condicionamento.

Figura 36 - Etapas da execução do ensaio Lottman: (a) aplicação de vácuo; (b) embalagem para condicionamento em freezer; (c) CP após a retirada do freezer; (d) banho-maria a 60°C; (e) banho-maria a 25°C; (f) rompimento



Fonte: Autora (2016)

Nestas condições a areia A apresentou-se insatisfatória e a areia B, satisfatória, no limite do que os pesquisadores apontam para a relação entre as RTCD da mistura, antes e depois do condicionamento. A Tabela 24 apresenta os resultados dos ensaios para as duas areias ensaiadas, onde a mistura com areia A apresentou cerca de 77% de perda da adesividade, enquanto que a mistura com areia B apresentou apenas cerca de 30% da adesividade.

Tabela 24 - Resultados do ensaio de adesividade ligante-agregado (Lottman)

		Areia A	Areia B
S <sub>1</sub>	Resist. Mec. Seca (kPa)	525,58	446,68
S <sub>2</sub>	Resist. Mec. Úmido (kPa)	120,21	312,2
S <sub>1</sub> /S <sub>2</sub>		0,23	0,7

Fonte: Autora (2016)

Para o ensaio de Lottman era esperado que a mistura com areia A apresentasse valor melhor do que encontrado, porém o resultado ficou aquém das expectativas, não atingindo pelo menos 50% do valor mínimo estabelecido pela norma AASHTO T 283. O valor de 77% de perda da adesividade da mistura é um valor muito acima do limite estabelecido, enquanto que a mistura com areia B, em que se esperavam valores mais baixos apresentou uma perda de adesividade dentro do limite da norma. Portanto, o ensaio de Lottman Modificado não apontou nenhuma vantagem da mistura A em relação à mistura com areia B.

### 3 ANÁLISE COMPARATIVA DAS MISTURAS DIMENSIONANDO ATRAVÉS DO MÉTODO MECANÍSTICO UTILIZANDO O PROGRAMA SISPAV

Para uma aplicação consciente dos modelos de fadiga é necessário que eles sejam comparados a partir de um mesmo referencial. Portanto para esta comparação, é importante que sejam estabelecidos perfis de pavimento para uma análise mecanística das misturas a fim de avaliar a fadiga e o desempenho mecânico da estrutura.

O correto dimensionamento de um pavimento asfáltico visa assegurar que o carregamento das rodas dos veículos aplicado sobre o pavimento não irá causar defeitos excessivos da camada de revestimento. Além de garantir que as espessuras das camadas sejam capazes de minimizar os efeitos dos afundamentos, considerando a compatibilidade entre as deformabilidades dos materiais.

Neste capítulo são apresentadas e analisadas as estruturas de pavimentos dimensionadas através do método mecanístico-empírico, o SisPav. Com o intuito de comparar estruturas de pavimentos flexíveis do tipo AAUQ com a utilização da areia A e da areia B é necessário partir de um mesmo referencial, então para esta comparação, foram considerados os materiais a seguir indicados, em que os valores de MR para o subleito, sub-base e base foram baseados no trabalho realizado por Bastos (2013):

- a) Subleito: solo natural da região, de comportamento laterítico e  $MR=50\text{MPa}$ ;
- b) Sub-base: solo de comportamento laterítico,  $MR=250\text{MPa}$  e espessura de 15 cm;
- c) Base: solo de granular,  $MR=550\text{MPa}$  e espessura de 15 cm;
- d) Revestimento: AAUQ CAP 50/70, valor de MR a utilizar será o encontrado na pesquisa para cada mistura e espessura de 5 cm.

O tipo de mistura utilizada no presente estudo se trata de um revestimento betuminoso, AAUQ, indicado para pavimentos de baixo volume de tráfego, portanto iremos utilizar o valor de  $5 \times 10^6$ . E para a completa análise é necessário definir a vida de projeto do pavimento, no presente estudo considerou-se uma vida de projeto de 10 anos.

Com base nos parâmetros iniciais de entrada do programa SisPav o dimensionamento do pavimento da mistura asfáltica com areia A apresentou a configuração da estrutura indicada na Tabela 25.

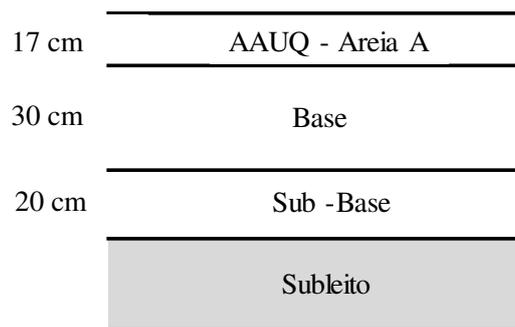
Tabela 25 - Camadas utilizadas na análise computacional da areia A

Camada	Material	Espessura (cm)	Coef. Poisson ( $\mu$ )	Módulo Elástico (MPa)
Revestimento	Material asfáltico (AAUQ)	17	0,30	1671,00
Base	Material granular	30	0,35	550
Sub-base	Solo laterítico	20	0,35	250
Subleito	Solos finos, siltosos ou argilosos	0	0,40	50,00

Fonte: Autora (2016)

Assim, o dimensionamento utilizando a mistura asfáltica com areia A resultou em um pavimento com a espessura total de 67cm, sendo o revestimento de 17cm, base de 30cm e sub-base de 20cm, Figura 37.

Figura 37 - Estrutura dimensionada para a mistura asfáltica com areia A



Fonte: Autora (2016)

Observa-se que a base, sub-base e o revestimento resultaram em dimensões acima dos utilizados inicialmente, que foi de 15 cm para a base e sub-base e de 5 cm para o revestimento.

A mistura asfáltica com areia B também foi dimensionada, a configuração das camadas utilizadas no dimensionamento são apresentadas na Tabela 26.

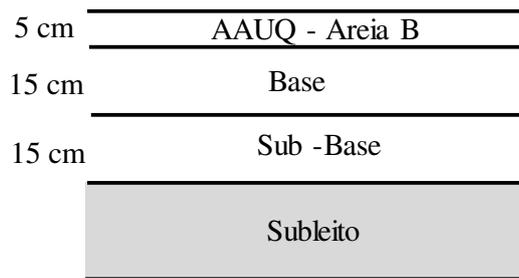
Tabela 26 - Camadas utilizadas na análise computacional da areia B

Camada	Material	Espessura (cm)	Coef. Poisson ( $\mu$ )	Módulo Elástico (MPa)
Revestimento	Material asfáltico (AAUQ)	5	0,30	2683,00
Base	Material granular	15	0,35	550
Sub-base	Solo laterítico	15	0,35	250
Subleito	Solos finos, siltosos ou argilosos	0	0,40	50,00

Fonte: Autora (2016)

O dimensionamento do pavimento com a utilização da mistura asfáltica com areia B, resultou em um pavimento de espessura total de 35cm, sendo 5cm de revestimento, 15cm de base e 15cm de sub-base, justamente os valores de partida utilizados, Figura 38.

Figura 38 - Estrutura dimensionada para a mistura asfáltica com areia B



Fonte: Autora (2016)

Ao final da análise do dimensionamento o programa SisPav informa o dano crítico causado ao pavimento e a vida de projeto estimada da estrutura, valores esses expressos na Tabela 27.

Tabela 27 - Vida de projeto e dano crítico causado ao pavimento

	Vida de projeto estimada (anos)	Dano crítico causado ao pavimento (%)
Areia A	10	99,61
Areia B	14	71,28

Fonte: Autora (2016)

Comparando as duas estruturas encontradas, para a areia A e areia B, observa-se que a areia B novamente apresentou desempenho superior à mistura asfáltica com areia A. A mistura asfáltica com areia B mesmo com uma estrutura mais esbelta, cerca de 12cm de revestimento, 15cm de base e 5cm de sub-base a menos que a estrutura da mistura asfáltica

com areia A, apresentou 4 anos a mais de vida de projeto e 28,33% a menos de danos causados ao pavimento, desempenho este superior aos valores obtidos do pavimento utilizando a mistura asfáltica com areia A.

## 4 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou algumas características físicas e propriedades mecânicas de interesse à engenharia rodoviária de misturas de areia asfalto usinada a quente, compostas por areia enquadrada na norma de Equivalente de Areia, aqui denominada "areia A" e por areia que não se enquadrou na referida norma, denominada "areia B". A prática rodoviária regional atesta que a mistura produzida com areia com equivalente baixo não traz qualidade inferior à mistura asfáltica produzida com a mesma.

O ensaio de Equivalente de Areia determina se uma areia é adequada para ser utilizada ou não em uma mistura betuminosa, pela potencial presença de partículas expansíveis. Comparando os resultados das areias em análise, observou-se que em quase todos os parâmetros e ensaios utilizados a areia que não se enquadrou na norma de EA apresentou resultados mais satisfatórios que a areia teoricamente apropriada.

A areia B não se enquadrou perfeitamente na faixa adotada da norma DNERT-ES-P 14/00, portanto apresentou porcentagem de finos maior do que o recomendado. Porém, apesar dessa elevada quantidade de material fino, a mistura se enquadrou nos parâmetros estabelecidos pela norma DNIT 032/2005 – ES, pois obteve estabilidade 25% maior do valor mínimo estabelecido pela norma; enquanto que a areia A, dentro dos parâmetros da norma de EA, apresentou estabilidade 46% menor do que o valor mínimo determinado por norma.

Para o enquadramento das areias na faixa utilizou-se a granulometria lavada por apresentar resultados mais precisos, porém pela elevada diferença nos valores das duas granulometrias realizadas é interessante realizar uma análise comparativa da influência da granulometria dos agregados miúdos na mistura asfáltica em pesquisas futuras.

No ensaio de RTCD as misturas asfálticas dos dois tipos de areia utilizadas obtiveram valores muito próximos, não havendo diferença entre as misturas neste ensaio.

O valor de MR das misturas asfálticas foram bastante distintos. A mistura com areia A obteve valor de MR igual a 1671MPa, enquanto que a mistura com areia B apresentou valor de 2683MPa. Logo, a mistura asfáltica com areia B, que possui uma quantidade elevada de materiais finos, possui um valor de MR 60,56% superior a areia A, apresentando uma maior rigidez.

Assim como no ensaio de MR, o de vida de fadiga também demonstrou uma vantagem maior da mistura asfáltica com areia B, cerca de 43,5%. Portanto, na maioria dos

ensaios de caracterização mecânica, a areia B apresentou melhores resultados, não sendo superior apenas nos ensaios de RTCD e no desgaste Cântabro.

Verificou-se a perda de adesividade dos agregados miúdos ao ligante asfáltico, por meio do ensaio de Lottman Modificado, onde há uma análise da perda de adesividade por umidade induzida. A areia A apresentou 77% de perda no ensaio de RTCD, valor bastante elevado; enquanto que a areia B obteve apenas 30% de perda de adesividade, valor este considerado aceitável.

Utilizando o programa SisPav e os resultados de módulo de resiliência obtidos em laboratório, sobre uma mesma estrutura de base, sub-base e subleito, inicialmente, obteve-se uma espessura resultante de 5cm de areia asfalto, utilizando a areia B, e inviáveis 17cm, utilizando areia A.

O que se observa é que o ensaio de Equivalente de Areia tem pouca influência nos resultados dos ensaios mecânicos das misturas de AAUQ, inclusive no dimensionamento, para as areias utilizadas neste trabalho. Devem-se buscar mais elementos para desqualificar um agregado miúdo, além do ensaio de equivalente de areia. De um modo geral, a mistura AAUQ com areia B apresentou melhores resultados nos ensaios mecânicos realizados neste trabalho.

A introdução de novos ensaios para verificação de parâmetros dos materiais e misturas utilizadas na pavimentação é importante para uma maior dinâmica ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UEMA. Apesar de existir na UEMA os equipamentos necessários para a realização do ensaio de angularidade, teor de matéria orgânica e o ensaio de Lottman Modificado, estes ensaios não são introduzidos e difundidos em estudos e pesquisas realizados no laboratório.

Portanto o presente trabalho contribuiu para a pavimentação maranhense, visto que proporcionou a realização e introdução de novos ensaios ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UEMA e também a obtenção do módulo de resiliência e as curvas de fadiga para as misturas de AAUQ com areia do Maranhão, fato este raro, dada a circunstância da inexistência de equipamentos no estado para a realização de tais ensaios.

Outros ensaios, como o de deformação permanente devem ser propostos para confirmar as conclusões aqui alcançadas, pois a partir da pesquisa realizada não foi possível distinguir ensaios específicos que demonstrassem em laboratório o dano causado à mistura de AAUQ quando se utiliza areia fora dos padrões da norma de ensaio do EA.

E como continuação do trabalho os resultados aqui explanados serão difundidos aos engenheiros rodoviários maranhenses em reunião na SINFRA-MA (Secretária de Infraestrutura do Maranhão), afim de que estes possam ter conhecimento sobre os materiais utilizados atualmente na pavimentação maranhense e sobre as problemáticas enfrentadas quando se utiliza areia fora das especificações da norma para o ensaio de EA nas misturas de AAUQ.

## REFERÊNCIAS

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 283**: resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage. USA, 1989.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13600**: solo-determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro, 1996. 2 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14950**: materiais betuminosos – determinação da viscosidade Saybolt-Furol. Rio de Janeiro, 1996. 10 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6560**: Materiais betuminosos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2008. 6 p

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005. 11 p

ADADA, L. B. **Programa de integração e capacitação – DER/2008**. Curitiba – PR, 2008.

ALBERNAZ, C. A. V.; CALDAS, J. E. F.; OLIVEIRA, S. E. de. **Avaliação Estrutural Simplificada De Pavimentos Através De Retroanálise**. 30ª Reunião Anual de Pavimentação. Salvador - BA, 1996.

ANTOSCZEZEM JUNIOR, J. A. **Desenvolvimento dos revestimentos asfálticos produzidos com asfaltos modificados por polímeros e borracha de pneus no Brasil**. Boletim Técnico do Sindicato da Indústria da Construção Pesada do Estado de São Paulo, 7ª edição. São Paulo – SP, 2012.

ASTM – 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 Gradinf). United States, 2003.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projetos e restauração. São Paulo, Oficina de Textos, 2003.

BASTOS, J. B. S. **Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza**. Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza - CE, 2013.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, 2007. V. 1. 520 p.

BOTTIN FILHO, I. A. **Estudo de mistura areia-asfalto pré-misturada a quente**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 1997.

CENTRO DE ESTUDIOS DE CARRETERAS. **NTL 362**: efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometria abierta, mediante ensayo cántabro de pérdida por desgaste. España, 1992.

COLPO, G. B. **Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2014.

COMINSKY, R. J.; KILLINGWORTH B. M.; ANDERSON R. M.; CROCKFORD W. W. Quality Control and Acceptance of Superpave - Designed Hot Mix Asphalt. **National Cooperative Highway Research Program**, 1998.

CORDEIRO, C. W. R. **Comportamento de concretos asfálticos projetados com cimento asfáltico modificado por borracha de pneus**. 2006. 253 p. Dissertação (Mestrado em engenharia de transportes) – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro - RJ, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Pavimentação**, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de projeto e práticas operacionais para segurança nas rodovias**. DNIT. Rio de Janeiro - RJ, 2010. 280p.

DERT - DEPARTAMENTO DE EDIFICAÇÕES, RODOVIAS E TRANSPORTES. **DERT-ES-P 14**: Areia Asfalto a Quente. Ceará, 2000.

DIAS, C. R. C. **Estudos de Misturas de Areia Asfalto e Cinza-cal para Emprego em Pavimentos Urbanos**. Tese de Mestrado apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 003**: material betuminoso – determinação da penetração. Rio de Janeiro, 1999. 2 p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 054**: equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997. 10 p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 082**: solos – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1998. 3 p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 083**: agregados: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998. 5 p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 084**: agregado miúdo: determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995. 3 p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 117**: mistura betuminosa: determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 122**: solos – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1994. 7 p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 133**: mistura betuminosa – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994. 5 p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 138**: misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 383**: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro. Rio de Janeiro, 1999. 2 p.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ES 031**: pavimentos flexíveis: concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2006. 14 p.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ES 032**: pavimentos flexíveis: areia asfalto a quente. Rio de Janeiro, 2005. 12 p.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ME 131**: materiais asfálticos – determinação do ponto de amolecimento – método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2010. 06 p.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. Tese de Doutorado apresentada a Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro - RJ, 2007.

GOUVEIA, L. T. de. **Avaliação do Ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA) da especificação Superpave**. Tese de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos – SP, 2002.

MARQUES, G. L. de O. **Terminologia e Classificação dos Pavimentos**. Curso Básico Intensivo de Pavimentação Urbana – Módulo I. Juiz de Fora – MG, 2002.

MENDES, C. B. A.; NUNES, F. R. **Asfalto Borracha – Minimizando os impactos ambientais gerados pelo descarte de pneus inservíveis no meio ambiente**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção – Civil), Faculdade Brasileira – UNIVIX – Vitória, 2009.

MOTTA, L. M. G. da. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; Critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro – RJ, 1991.

MOTTA, L. M. G. da; MEDINA, J. de. **Mecânica dos Pavimentos**. 574 p. 2ª edição. Rio de Janeiro, 2005.

**Pesquisa CNT de rodovias 2015: relatório gerencial** – Brasília: CNT : SEST : SENAT, 2015.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Tese de Doutorado apresentada a Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 1991.

SANT'ANA, W. **Contribuição ao Estudo de Solo-Emulsão em Pavimentos de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego**. Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da USP, 2009.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação – Volume 1**. Editora Pini, 2ª edição. São Paulo, Brasil, 2008.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação – Volume 2**. Editora Pini, 1ª edição. São Paulo, Brasil, 2001.

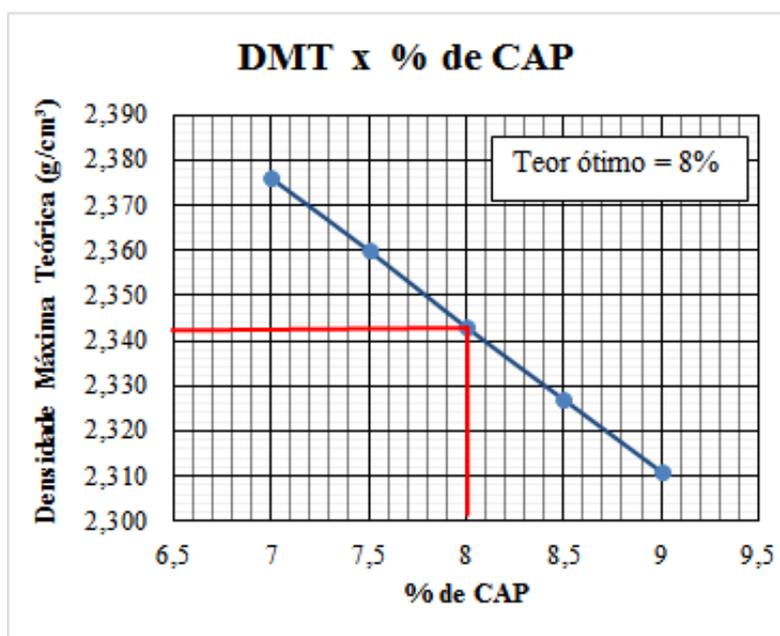
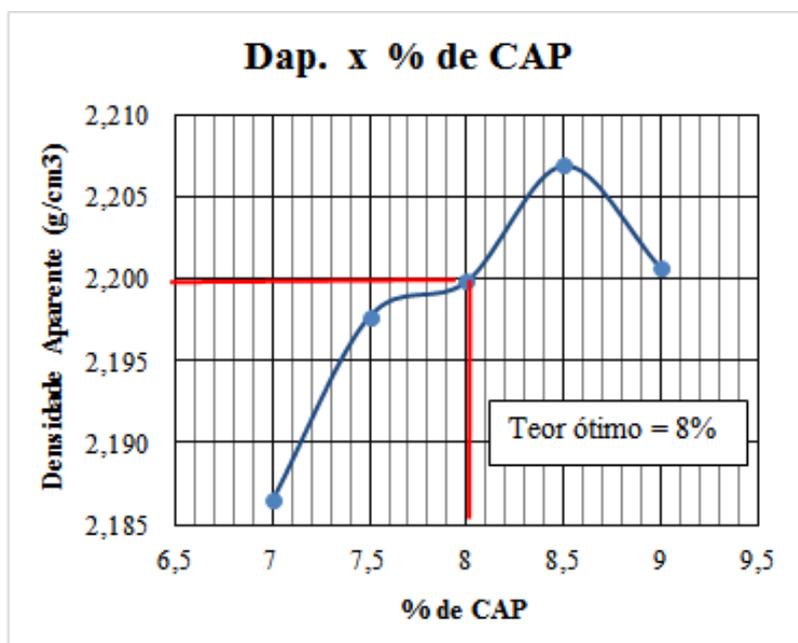
SILVA, A. H. M. da. **Avaliação do comportamento de pavimentos com camada reciclada de revestimentos asfálticos a frio com emulsão modificada por polímero**. 2011. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

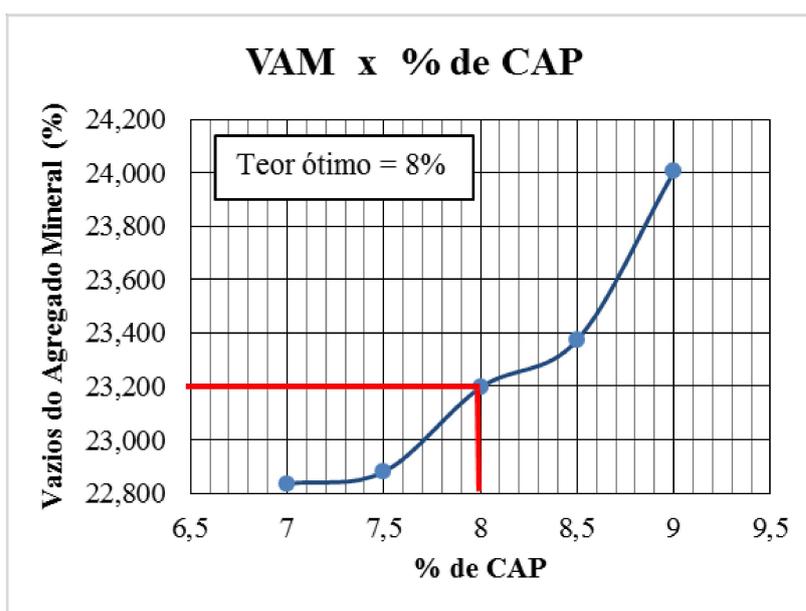
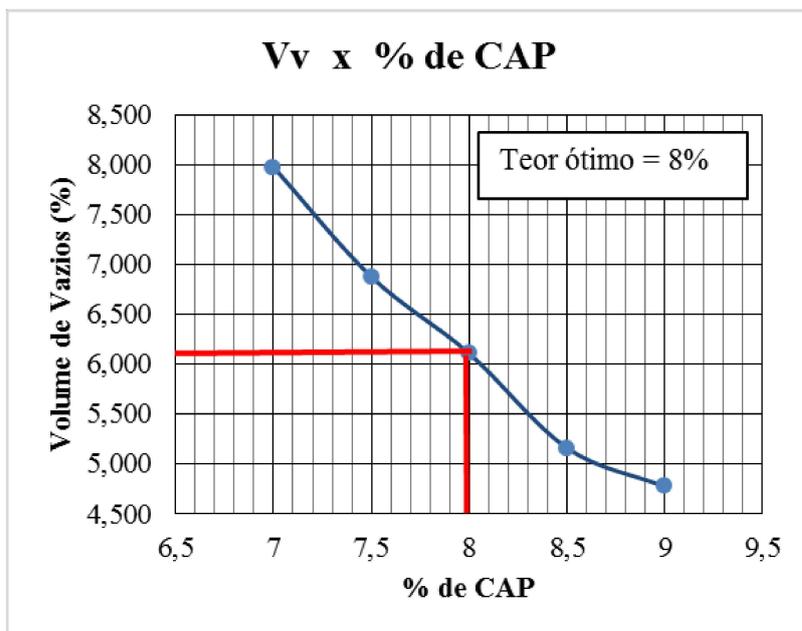
SILVEIRA, M. A. **Estudo de adição de polímero em areia-asfalto a frio**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos – SP, 1999.

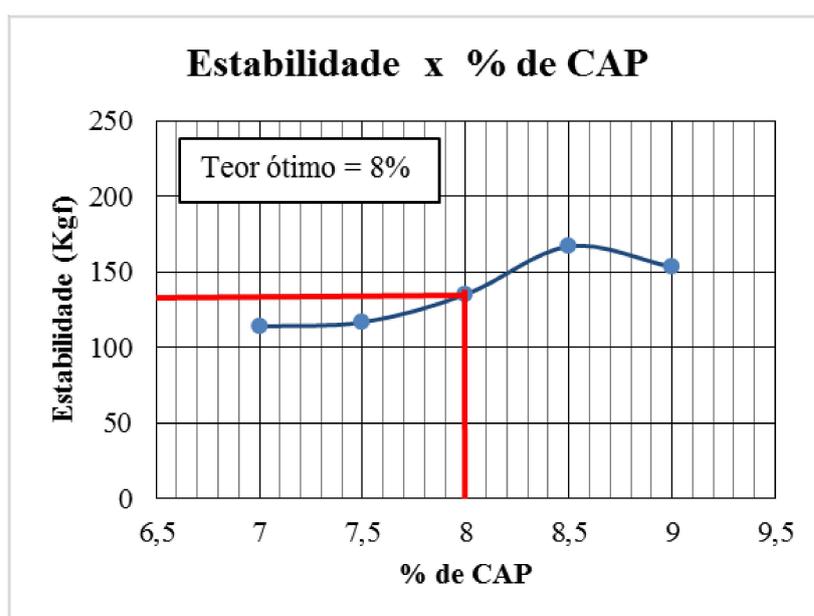
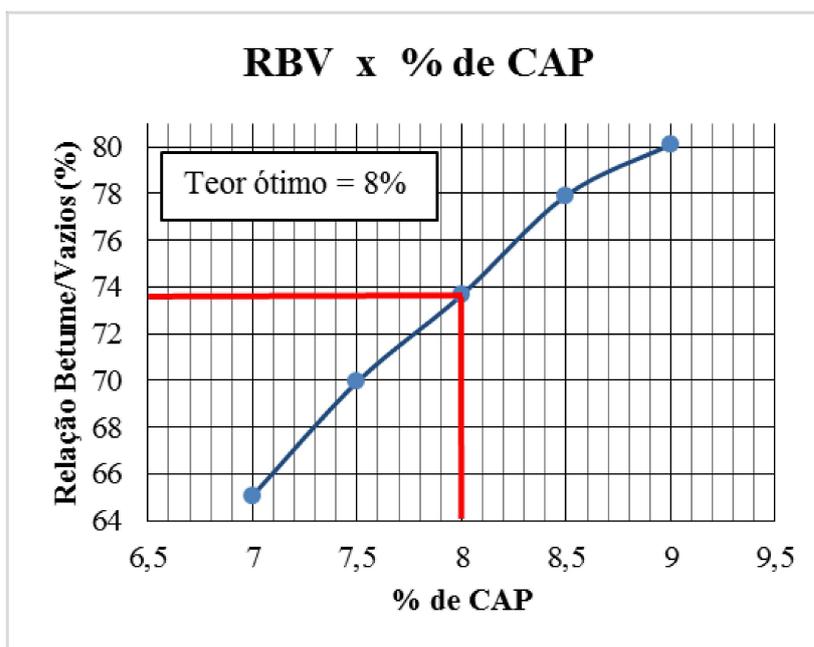
TANGELLA, S. C. S. R.; CRAUS, J.; DEACON, J. A.; MONISMITH, C. L. **Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures**. Prepared for Strategic Highway Research Program, Project A-003-A. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1990.

## **APÊNDICES**

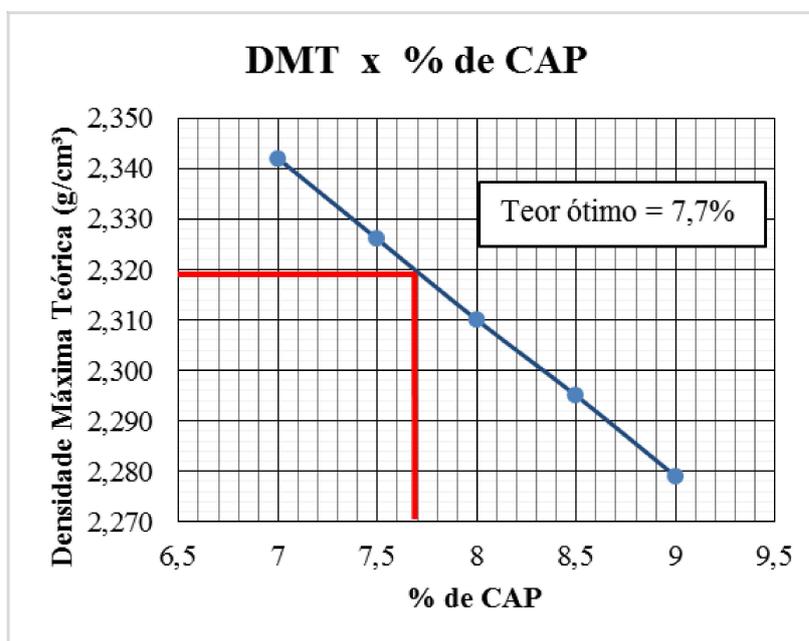
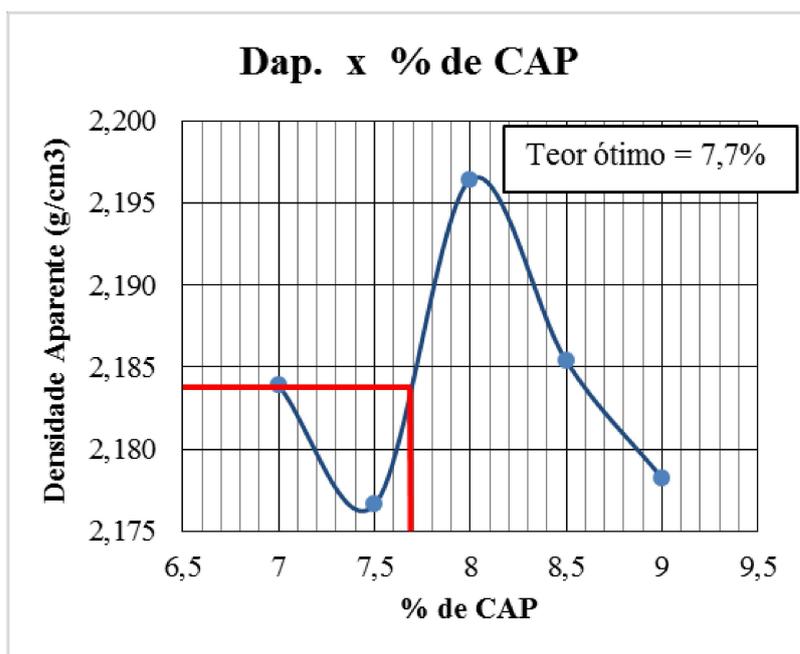
APÊNDICE A – CURVAS DOS PARÂMETROS DA DOSAGEM MARSHALL PARA  
AS MISTURAS UTILIZANDO AREIA A

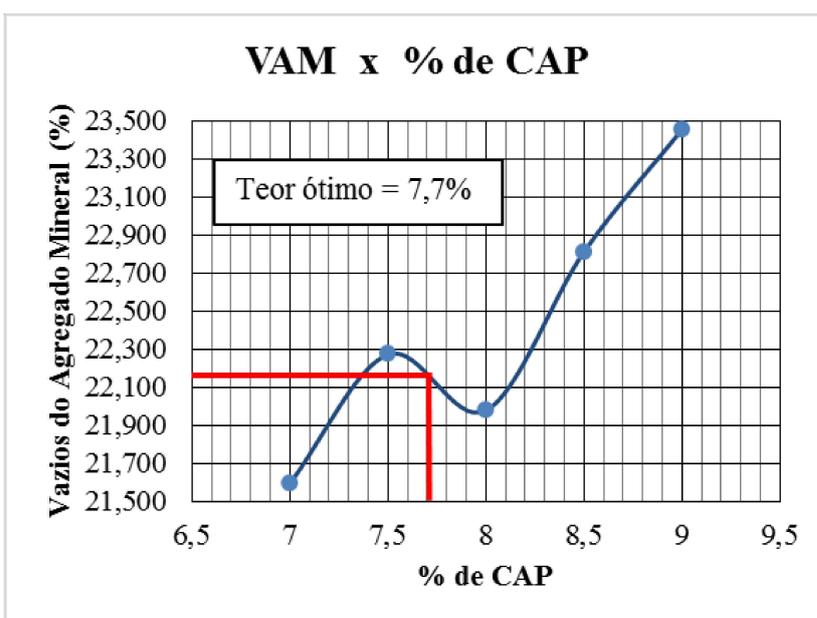
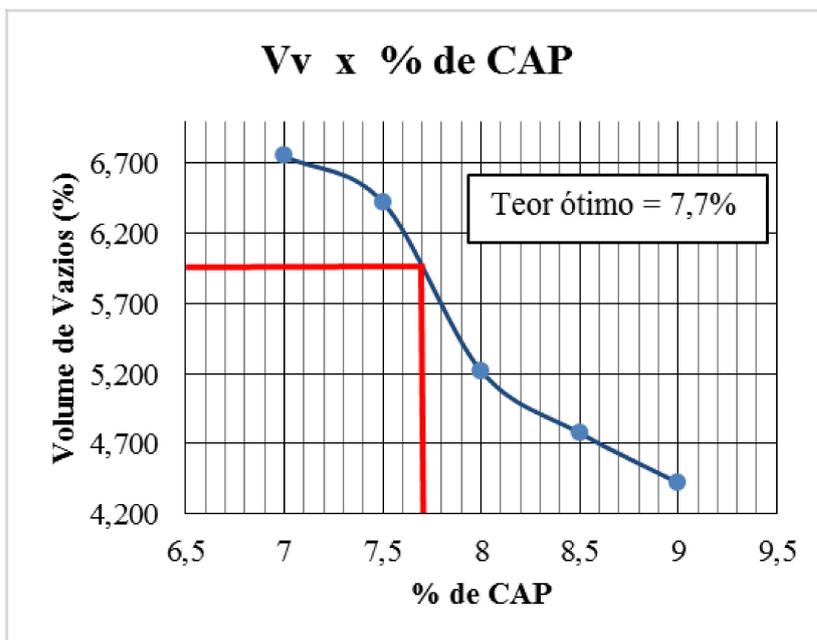


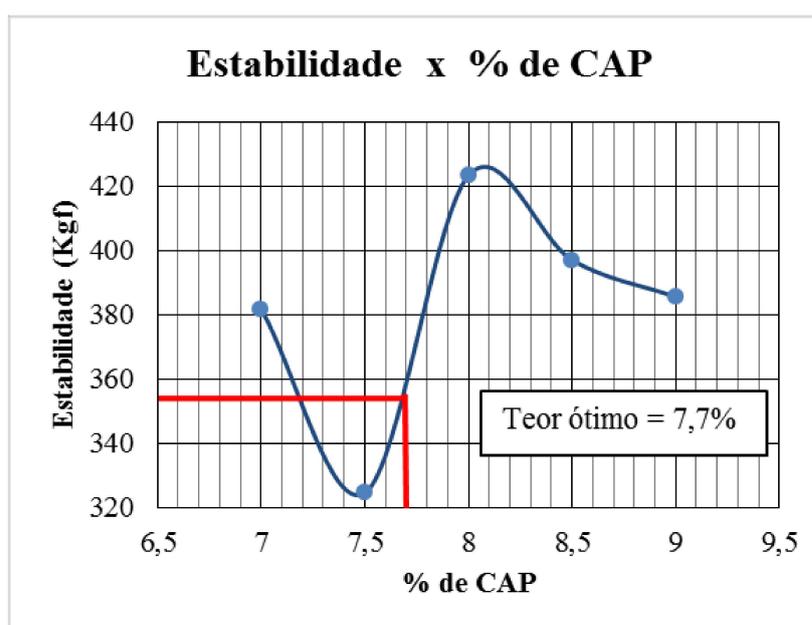
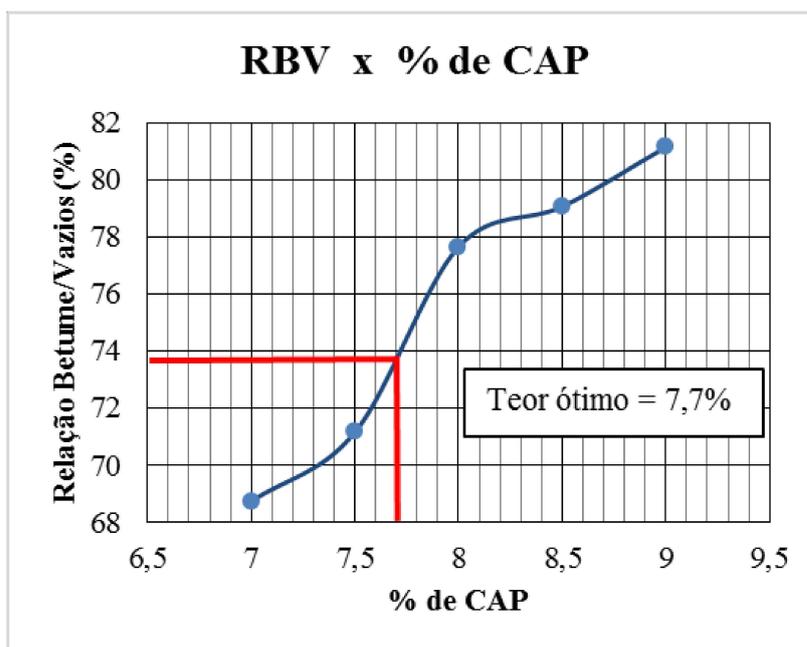




**APÊNDICE B – CURVAS DOS PARÂMETROS DA DOSAGEM MARSHALL PARA AS MISTURAS UTILIZANDO AREIA B**

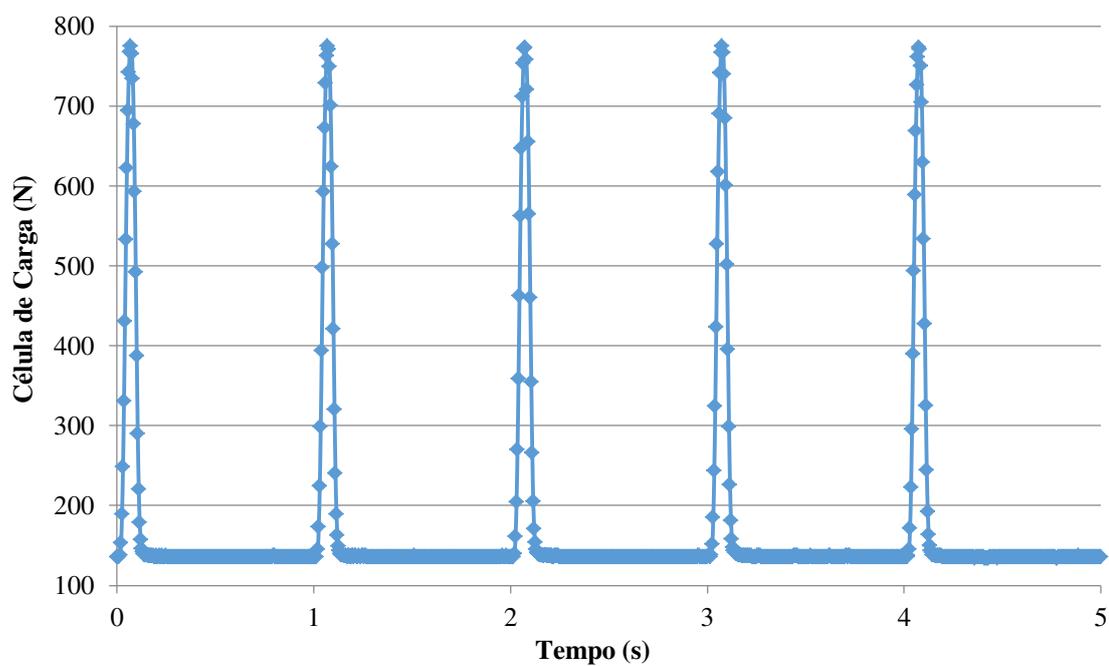




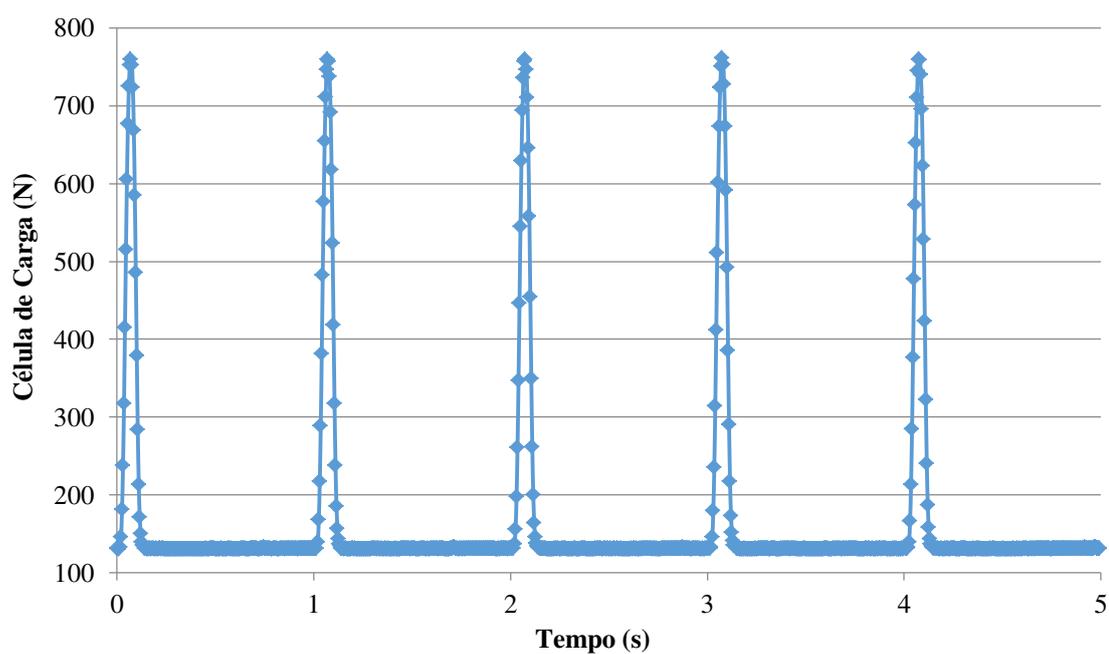


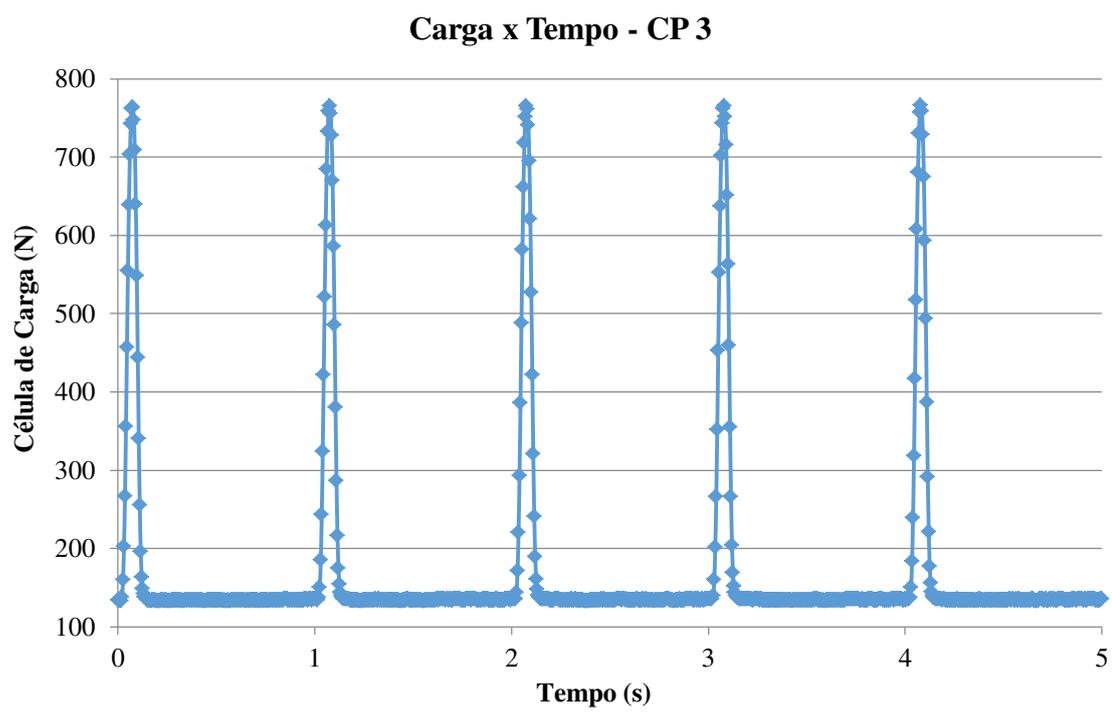
**APÊNDICE C – GRÁFICOS DA CARGA APLICADA EM FUNÇÃO DO TEMPO  
OBTIDOS APARTIR DO ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA OS  
CORPOS DE PROVA DE AAUQ UTILIZANDO AREIA A**

**Carga x Tempo - CP 1**



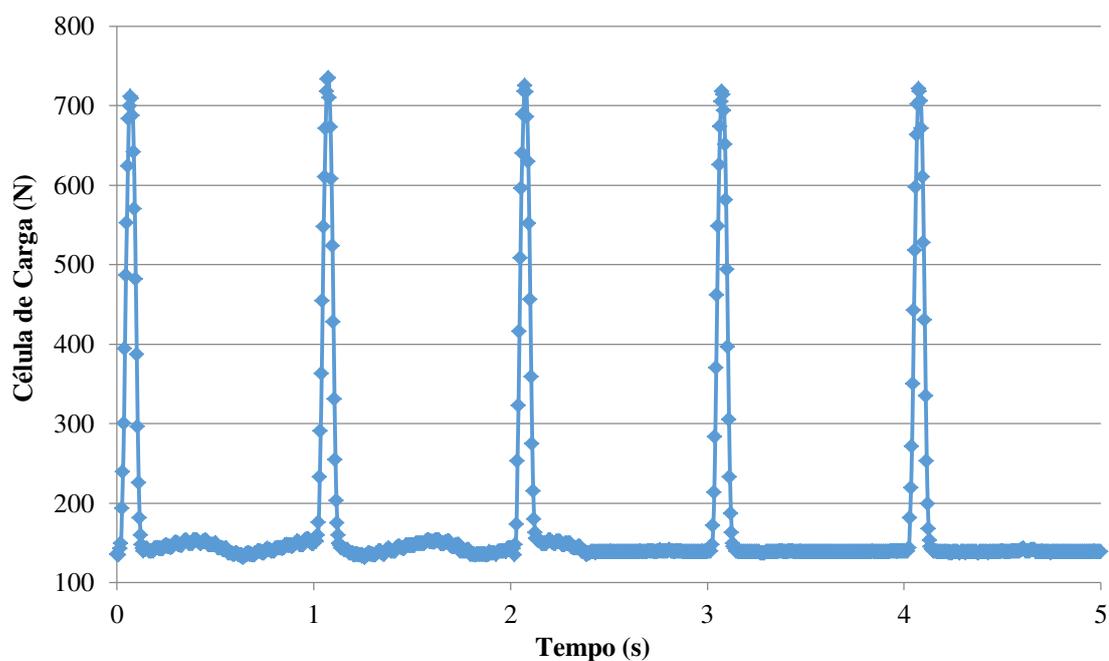
**Carga x Tempo - CP 2**



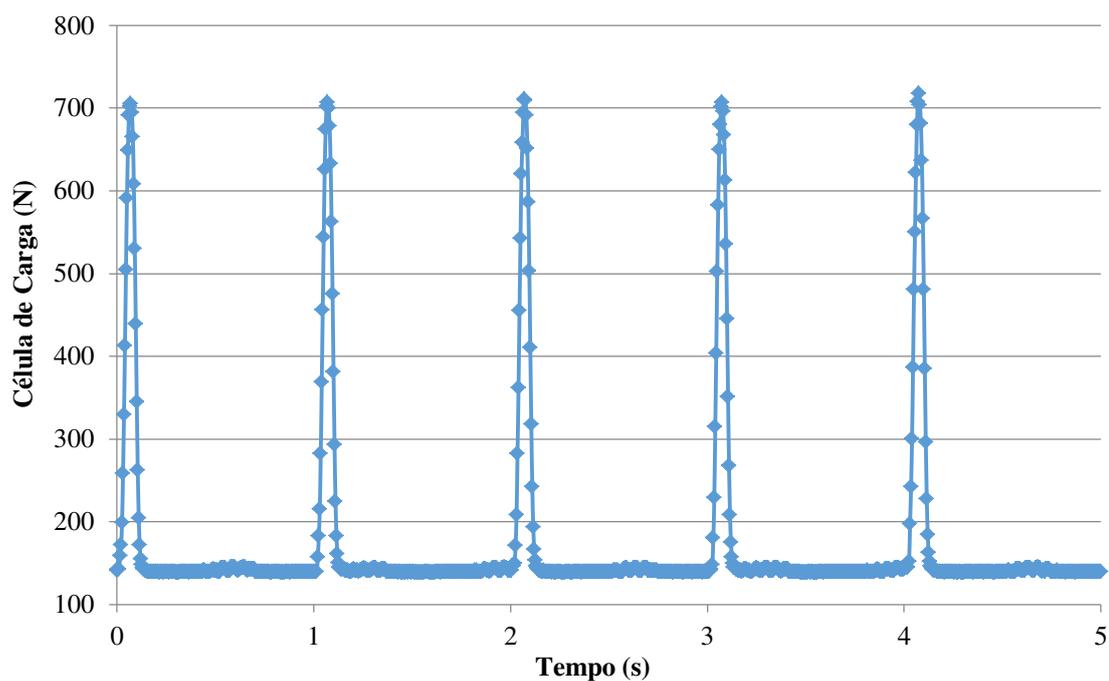


**APÊNDICE D – GRÁFICOS DA CARGA APLICADA EM FUNÇÃO DO TEMPO  
OBTIDOS APARTIR DO ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA OS  
CORPOS DE PROVA DE AAUQ UTILIZANDO AREIA B**

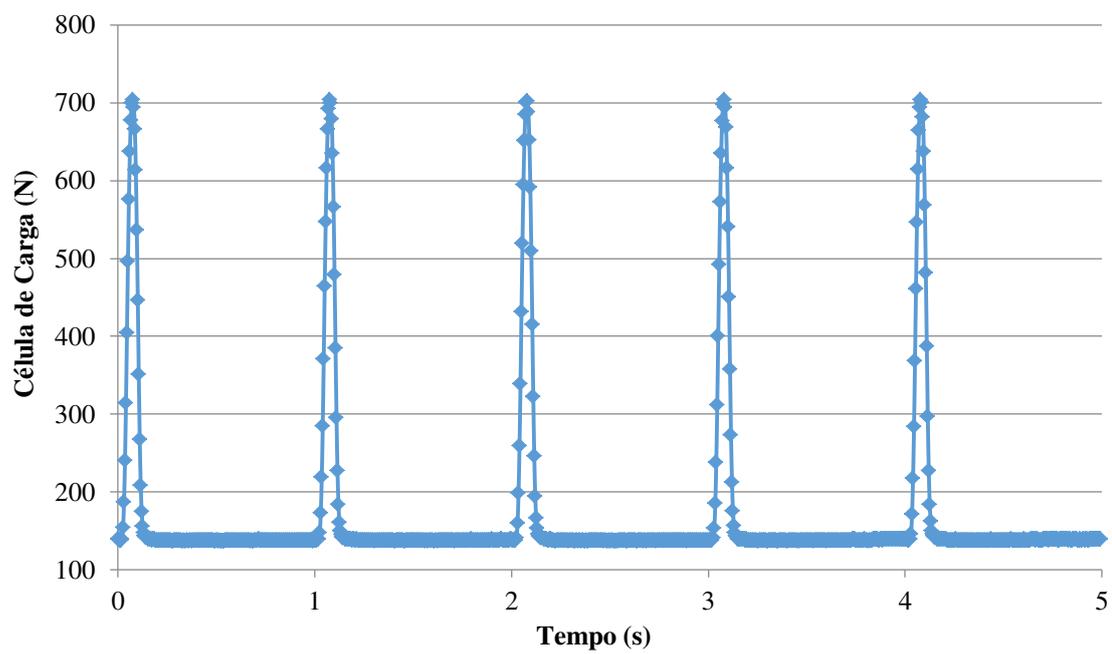
**Carga x Tempo - CP 1**



**Carga x Tempo - CP 2**

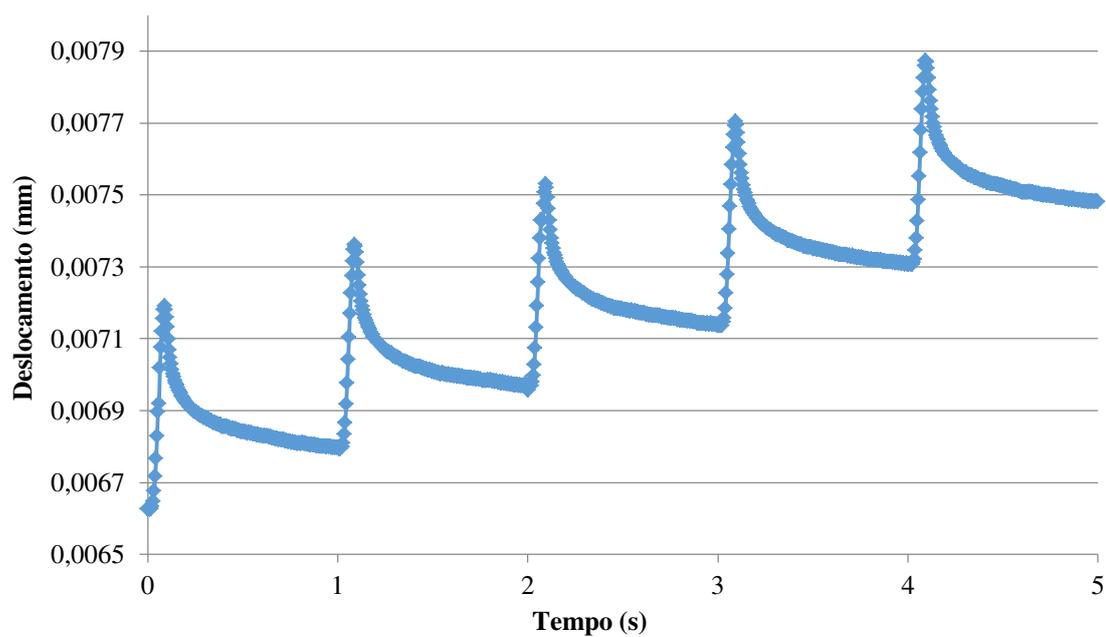


Carga x Tempo - CP 3

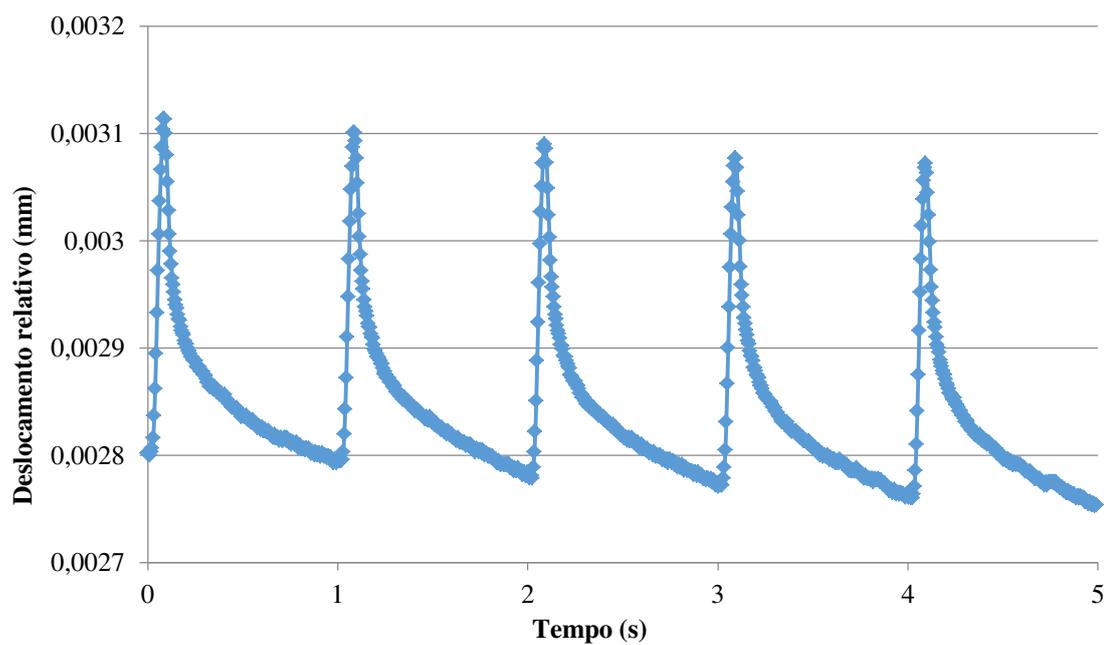


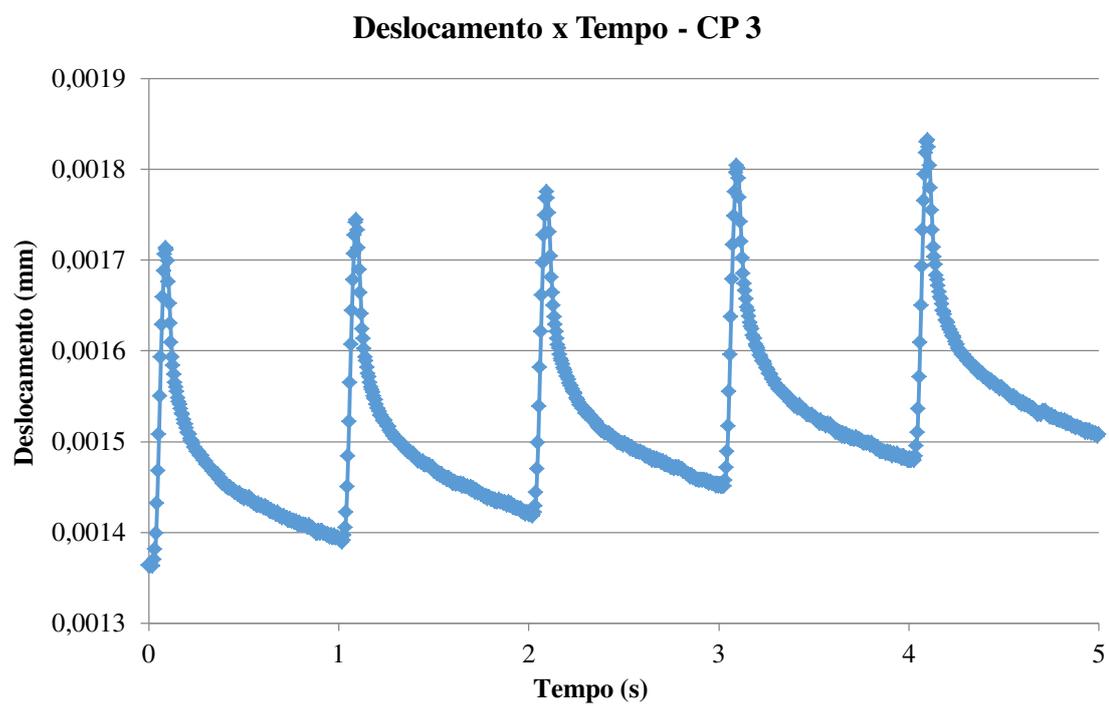
**APÊNDICE E – GRÁFICOS DO DESLOCAMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO  
OBTIDOS APARTIR DO ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA OS  
CORPOS DE PROVA DE AAUQ UTILIZANDO AREIA A**

**Deslocamento x Tempo - CP 1**



**Deslocamento x Tempo - CP 2**





**APÊNDICE F – GRÁFICOS DO DESLOCAMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO  
OBTIDOS APARTIR DO ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA OS  
CORPOS DE PROVA DE AAUQ UTILIZANDO AREIA B**

