

Programa de Pós-Graduação em **Engenharia Civil e Ambiental**

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Departamento de Engenharia Civil

**INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NAS
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE MISTURAS
ASFÁLTICAS PARA AERÓDROMOS**

DANILO FERNANDES DE MEDEIROS

Campina Grande
Data: ABRIL / 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
Área de Geotecnia

**INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE
MISTURAS ASFÁLTICAS PARA AERÓDROMOS**

Por:

DANILO FERNANDES DE MEDEIROS

Dissertação apresentada ao Centro de Tecnologia e Recursos
Naturais da Universidade Federal de Campina Grande –
Campina Grande/PB, como parte dos requisitos necessários
para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**

Campina Grande – Paraíba

Abril de 2009



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

Medeiros, Danilo Fernandes

2009 Influência da Granulometria nas Características Mecânicas das Misturas
Asfálticas para Aeródromos, Danilo Fernandes de Medeiros. — Campina Grande/PB, 2009.

123f.: il.

Referências.

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

Orientador: Dr. Erinaldo Hilário Cavalcante.

1— Pavimentos de Aeroportos 2— Misturas Betuminosas 3— Granulometria

DANILO FERNANDES DE MEDEIROS

Dissertação apresentada ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande-PB, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**.

Área de Concentração – Geotécnica

Prof. Dr. Erinaldo Hilário Cavalcante
(Orientador)

Campina Grande – Paraíba
Abril de 2009

Autor: Danilo Fernandes de Medeiros

Título: INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS PARA AERÓDROMOS

Dissertação Defendida e Aprovada em: ____/____/____.

Peia Banca Examinadora

(Assinatura): Erinaldo Hilário Cavalcante

PROF. Dr. (ORIENTADOR) ERINALDO HILARIO CAVALCANTE
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE - UFS/DEC

(Assinatura): John Kennedy Guedes Rodrigues

PROF. Dr. (CO-ORIENTADOR) JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG/UAEC

(Assinatura): Sandra Oda

PROFª. Drª. (EXAMINADOR EXTERNO) SANDRA ODA
COPPETEC

(Assinatura): Adriano Elisio de Figueiredo Lopes Lucena

PROF. Dr. (EXAMINADOR INTERNO) ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG/UAEC

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a Deus,

À minha esposa Mainara Teles P. Dourado, por seu amor e dedicação.

Aos meus pais Raimundo Tadeu e Maria de Fátima, pela minha educação e formação.

As minhas irmãs Irbia e Moema.

Ao meu orientador professor Erinaldo pela sua dedicação e paciência.

Aos meus amigos Washington, Saul entre outros pelo apoio e força.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Erinaldo Hilário Cavalcante pela dedicação e orientação desta pesquisa, pelo incentivo e apoio até mesmo nos momentos difíceis.

À ATECEL, na pessoa do Professor MSc. Francisco B. Lucena, pela disponibilidade de equipamentos e recursos para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da UFCG.

A CAPES pela bolsa de estudos concedida.

Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, em especial a secretária Josete de Sousa e Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues.

À coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil da UFCG

333A Universidade Federal de Sergipe, Laboratório de Geotécnica e Pavimentação, em especial aos técnicos Washington Santos e Willami Santos, pela realização dos ensaios de Módulo de Resiliência.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais da UFCG,
Aos amigos da UFCG: Saul Guedes, André Quintans, Lêda Lucena, Fábio Cunha, Paulo Braz, e outros que deram sua contribuição em particular.

Aos funcionários da área de Geotecnia da UFCG, em especial, a Rui Pereira de Oliveira.

Aos funcionários da ATECEL, Mano, Eugenio, Eliane, Marcos e Lelé.

Aos Amigos de empresa Ricardo Sudano e Edilson Vieira.

E a todos que contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Ilustração da volumetria numa mistura asfáltica..... | 7 |
| Figura 2.2 Ilustração da DMT para misturas asfálticas..... | 7 |
| Figura 2.3 Ilustração dos vazios existentes entre os agregados recobertos ou entre os grumos | 9 |
| Figura 2.4 Tampa de borracha com orifício preenchido com vidro de diâmetro reduzido [VASCONCELOS et al., 2003]..... | 10 |
| Figura 2.5 Equipamentos utilizados para realização da compactação dos corpos-de-prova automático..... | |
| [(a) Compactador automático (b) Soquete + Cilindro) | 15 |
| Figura 2.6 Equipamentos utilizados para realização da compactação dos corpos-de-prova manual | |
| [(a) Compactador manual (d) Soquete + Cilindro) | 15 |
| Figura 2.7 Curva Fuller SUPERPAVE | 19 |
| Figura 2.8 Compactador Giratório SUPERPAVE | 24 |
| Figura 2.9 (Diagramas da classificação das misturas asfálticas segundo a distribuição dos granulométrica da mistura)..... | 28 |
| Figura 3.1 Pedreira BRITEX | 36 |
| Figura 3.2 Detalhes da textura dos agregados graúdos | 37 |
| Figura 3.3 Detalhes da textura dos agregados miúdos | 37 |
| Figura 3.4 A cal hidratada | 39 |
| Figura 3.5 Cimento asfáltico de petróleo utilizado na pesquisa (CAP) | 40 |
| Figura 3.6 Processo de quarteamento das Amostras de agregados..... | 42 |
| Figura 3.7 -Equipamento utilizado para realização do ensaio de difração a laser..... | 43 |
| Figura 3.8 Equipamento Saybolt-Furol | 44 |
| Figura 3.9 Curvas Fuller da Mistura 01..... | 46 |
| Figura 3.10 Curvas Fuller da Mistura 02..... | 47 |
| Figura 3.11 Curvas Fuller da Mistura 03..... | 48 |
| Figura 3.12 Sequencia de procedimentos para dosagens Marshall feitas nesta pesquisa | 49 |
| Figura 3.13 (a) Compactador Marshall, (b) Desmoldagem dos CPs, (c) Medição dos CPs..... | 50 |
| Figura 3.14 Equipamentos utilizados para realização do ensaio Marshall [(a) Molde (b) Banho Maria (c) Prensa + Pórtico de Ruptura)..... | 51 |
| Figura 3.15 Equipamentos utilizados para realização de Resistência à Tração [(a) Prensa + Pórtico de Ruptura, (b) Portico de Ruptura Lobo Carneiro, (c) Corpo-de-prova após aplicação da carga de ruptura) | 55 |
| Figura 3.16 Equipamentos utilizados Procedimento de condicionamento do ensaio de Lotman | |
| [(a) Bomba de vácuo, (b) CPs Papel filme, (c) Ciclo de Congelamento, (d) Banho Maria]..... | 57 |
| Figura 3.17 Foto do equipamento usado para ensaios de resiliência no GeoPav/UFS – SIEMBS | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.1 Distribuição dos tamanhos das partículas da cal obtida por difração a laser | 60 |
| Figura 4.2 Gráfico de Viscosidade Saybolt-Furol. | 61 |
| Figura 4.3 [Gráfico de Estabilidade, % V]..... | 63 |
| Figura 4.4 [Gráfico de , RBV, VAM]..... | 64 |
| Figura 4.5 Gráfico para obtenção no número de golpes para o ensaio de Lotman.com a mistura 1 | 67 |
| Figura 4.6 Gráfico para obtenção no número de golpes para o ensaio de Lotman.com a mistura 2 | 68 |
| Figura 4.7 Gráfico para obtenção no número de golpes para o ensaio de Lotman com a mistura 3. | 68 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 2.1 Esforço de Compactação para o Compactador Giratório SUPERPAVE | 25 |
| Quadro 2.2 Faixa de distribuição dos grãos para revestimento Asfáltico segundo Aeronáutica | 29 |
| Quadro 2.3 Faixa de distribuição dos grãos para revestimento Asfáltico segundo a FAA (Federal Aviation Administration)..... | 30 |
| Quadro 3.1 Distribuição granulométrica da Mistura 01..... | 46 |
| Quadro 3.2 Distribuição granulométrica da Mistura 02..... | 47 |
| Quadro 3.3 Distribuição granulométrica da Mistura 03..... | 48 |
| Quadro 3.4 Teor de Ligantes utilizados nas Misturas..... | 50 |

LISTA DE FLUXOGRAMAS

| | |
|---|----|
| Fluxograma 3.1 Ensaio de Viscosidade Saybolt-Furol..... | 45 |
| Fluxograma 3.2 Sequência do Ensaio de Marshall | 49 |
| Fluxograma 3.3 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral..... | 54 |
| Fluxograma 3.4 Ensaio de Lottman..... | 58 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 Diferenças entre pavimento rodoviário e de aeroporto (Adaptado de: MEDINA, 1997) | 4 |
| Tabela 2.2 Especificação da Aeronáutica para Misturas Asfálticas de Aeródromos | 5 |
| Tabela 2.3 Valor mínimo de VAM segundo o tamanho máximo do agregado utilizado na mistura..... | 5 |
| Tabela 2.4 Pontos de Controle de Acordo com o Tamanho Máximo do Agregado (SUPERPAVE) | 20 |
| Tabela 2.5 Zona de Restrição de Acordo com o Tamanho Máximo do Agregado (SUPERPAVE) | 21 |
| Tabela 2.6 Recomendação SUPERPAVE para Vazios de Agregados Mineral (SUPERPAVE)..... | 22 |
| Tabela 2.7 Classificação dos Cimentos Asfálticos quanto à viscosidade e penetração (DNIT 095/2006-ME)..... | 32 |
| Tabela 2.8 Classificação dos CAPs pela especificação SUPERPAVE nos EUA. | 32 |
| Tabela 2.9 Valores de MR de Misturas Asfálticas | 35 |
| Tabela 2.10 Módulo de Resiliência para CAUQ convencionais..... | 35 |
| Tabela 3.1 Granulometria em % do peso passante do agregados..... | 38 |
| Tabela 3.2 Caracterização dos Materiais | 39 |
| Tabela 3.3 Ensaio de caracterização do asfalto | 41 |
| Tabela 3.4 Características do ligante asfálticos CAP 50/70, Fazenda Alegre, segundo especificação SUPERPAVE..... | 41 |
| Tabela 3.5 Normas utilizadas para caracterização dos agregados e filler..... | 43 |
| Tabela 3.6 Normas utilizadas para a realização dos ensaios de caracterização do CAP..... | 44 |
| Tabela 4.1 Massa específica real da Cal Hidratada CH-I..... | 60 |
| Tabela 4.2 Temperatura de Trabalho..... | 62 |
| Tabela 4.3 Resultados das características das misturas nos teores de projeto de ligante..... | 65 |
| Tabela 4.4 Características do revestimento segundo critérios da Aeronáutica e FAA..... | 65 |
| Tabela 4.5 Resultados do ensaio de Resistência a Tração (RT) da Misturas a 25°C. | 67 |
| Tabela 4.6 Número de golpes para obtenção dos volumes de vazios entre 6 à 8% nas da misturas..... | 69 |
| Tabela 4.7 Resultado Ensaio Lottman..... | 69 |
| Tabela 4.8 Resultado Ensaio Modulo de Resiliencia (30°C). | 69 |
| Tabela 4.9 Resultado razão MR/RT das misturas estudadas..... | 70 |
| Tabela 4.10 Resultado dos Ensaio das características mecanicas das misturas em estudo | 72 |

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| | |
|----------|--|
| AASHTO | American Association of State Highway and Transportation Officials |
| AAUQ | Areia Asfáltica Usinado à Quente |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANAC | Agencia Nacional de Aviação Civil |
| ASTM | American Society for Testing and Material |
| ATECEL | Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior |
| CAP | Cimento Asfáltico de Petróleo |
| CBR | Índice de Suporte Califórnia |
| CGS | Compactador Giratório SUPERPAVE |
| CPA | Camada Porosa de Atrito |
| DNER | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem |
| DNIT | Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transporte |
| DMT | Massa Específica Teórica das Misturas Asfálticas |
| FAA | Federal Aviation Administration |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; |
| IDT | Indirect Tensile Tester |
| INFRAERO | Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária |
| MR | Módulo de Resiliência |
| NBR | Norma Brasileira Registrada |
| NSMA | Norma de Infra-Estrutura da Aeronáutica |
| PG | Performance Grade |
| RBV | Relação Betume Vazios |
| RIS | Relação entre Índices de Suporte |
| RT | Resistência à Tração |
| RRT | Relação da Resistência à Tração |
| SHRP | Strategic Highway Research Program |

| | |
|-----------|---|
| SMA | Stone Matrix Asphalt |
| SUPERPAVE | Superior Performance Asphalt Pavements |
| USACE | A United States Army Corps of Engineers |
| UFCG | Universidade Federal de Campina Grande |
| UFS | Universidade Federal de Sergipe |
| VAM | Vazios do Agregado Mineral |
| VCB | <i>Vazios Preenchidos com Asfalto</i> |
| ZR | Zona de Restrição |

RESUMO

Com a necessidade de alcançar longas distâncias em períodos de tempo menores, o uso do modal de transporte aéreo tem apresentado um expressivo crescimento nas últimas décadas, além do aumento do peso das aeronaves. Devido ao baixo investimento na infra-estrutura aeroviária do país, as normas de projeto de pavimentos de aeroportos tem recebido poucas modificações, principalmente no que se refere às misturas asfálticas para os revestimentos. Diante deste cenário, e sabendo-se da importância do papel da composição granulométrica nas misturas betuminosas, visto que a granulometria de uma mistura pode ocasionar maior risco de aparecimento de patologias prematuras no revestimento, propôs-se nesta pesquisa analisar a influência da granulometria dos agregados no comportamento físico e mecânico das misturas asfálticas, compreendidas na Faixa 2 da Aeronáutica. Além das características físicas das misturas estudadas e dos demais parâmetros do ensaio Marshall, a pesquisa esteve focada na variação da resistência à tração, RT, e do módulo de resiliência, MR, dentro da faixa considerada. Para alcançar os objetivos propostos, foram utilizadas três misturas granulométricas, duas enquadradas próximas aos limites superior e inferior da referida faixa, e uma próxima à linha de máxima densidade. As dosagens das misturas foram realizadas de acordo com a metodologia Marshall. Foram realizados os ensaios de Resistência à Tração por compressão diametral, Resistência ao Dano pela umidade induzida e o ensaio de Módulo de Resiliência, nos teores de projeto de ligante determinados para cada mistura. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que as três misturas se apresentaram satisfatórias quanto às características volumétricas e de estabilidade Marshall, atendendo aos parâmetros estabelecidos pela norma da aeronáutica. Entretanto, com base em uma análise conjunta das propriedades mecânicas (MR e RT) das misturas, cujas granulometrias se aproximam do limite superior da faixa 2 da aeronáutica, concluiu-se que estas tendem a se tornar inadequadas para a utilização como revestimento de aeródromos.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentos de aeroportos, misturas betuminosas, granulometria.

A B S T R A C T

With the need to achieve longer distances in shorter periods, the modal of air transport has shown a significant growth in recent decades, besides increasing the weight of the aircraft. Due to low investment in country's airway infrastructure, the rules for design of pavements of airports have received few changes, especially with regard to asphalt mixtures for covering. Up against this scenario, and knowing the role of particle size distribution in bituminous mixtures, as the size of a mixture can cause increased risk of premature onset of pathologies in the covering, it was proposed in this study to analyze the influence of the size of households in the physical and mechanical behavior of asphalt mixtures, ranging in range 2 of Aeronautics. Besides the physical characteristics of the mixtures studied and the other parameters of Marshall test, the research was focused on the variation of tensile strength, RT, and the type of resilience, MR, within the range considered. To achieve the objectives, three mixtures were used, two that fit near the upper and lower limits of that range, and a forthcoming line of maximum density range of 2. The strengths of the mixture were performed according to the Marshall methodology. It has been made the tests of tensile diametral compression, resistance to damage induced by moisture and test module Resilience in levels of project binder for each mixture. As determined from the results obtained, it was found that the three mixtures are showed satisfactory on the characteristics and volume of Marshall Stability, given the parameters set by the standard of the Aeronautics. However, based on a joint analysis of mechanical properties (MR and RT) of mixtures whose sizes are approaching the upper limit of the band 2 of the Aeronautic, it was concluded that tend to become unsuitable for use as a covering of airfields.

KEY WORDS: (Pavement of airports , mixtures bituminous, gradation selection)

S U M Á R I O

| | |
|---|----|
| 1.0 Introdução..... | 1 |
| 1.1 Objetivos..... | 2 |
| 1.1.1 Geral..... | 2 |
| 1.1.2 Específicos..... | 2 |
| 1.1.3 Organização do Trabalho..... | 2 |
| 2.0 Fundamentações Teórica..... | 3 |
| 2.1 Pavimentos de Aeroportos..... | 3 |
| 2.2 Dosagens de Misturas Asfálticas..... | 6 |
| 2.2.1 Parâmetros Volumétricos das Misturas..... | 7 |
| 2.2.1.1 Massa Especifica Máxima Teórica das Misturas Asfálticas..... | 7 |
| 2.2.1.2 Ponderação das Massas Especifica Reais..... | 8 |
| 2.2.1.3 Massas Especificas Máxima Teórica (Gmm) Procedimento da Astm D 2041 Utilizando Vácuo..... | 9 |
| 2.2.1.4 Massas Especificas Máxima Teórica (Gmm) Procedimento com Querosene..... | 10 |
| 2.2.2 Parâmetros Volumétricos..... | 12 |
| 2.2.2.1 Porcentagem Vazios da Mistura (%V)..... | 12 |
| 2.2.2.2 Vazios Preenchido com Asfalto (VCB)..... | 12 |
| 2.2.2.3 Relação Betume Vazio..... | 13 |
| 2.2.2.4 Porcentagem de Vazios do Agregado Mineral (VAM)..... | 13 |
| 2.3 Dosagem Marshall..... | 14 |
| 2.4 Método dosagem Superpave..... | 17 |
| 2.4.1 Seleção dos Agregados..... | 18 |
| 2.4.2 Granulométrica..... | 18 |
| 2.4.3 Compactação por Amassamento..... | 23 |
| 2.5 Agregados..... | 26 |
| 2.5.1 Distribuição dos Grãos..... | 27 |
| 2.6 Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP..... | 30 |
| 2.6.1 Composição Química..... | 30 |
| 2.6.2 Classificação dos CAP..... | 31 |
| 2.7 Parâmetros Mecânicos..... | 33 |
| 2.7.1 Módulo de Resiliência..... | 33 |
| 3.0 Materiais e Métodos..... | 36 |
| 3.1 Materiais..... | 36 |
| 3.1.1 Agregado Graúdo..... | 36 |
| 3.1.2 Agregado Miúdo..... | 37 |
| 3.1.3 Cal Hidratada (Filler)..... | 39 |

| | |
|--|----|
| 3.1.4 Cimento Asfáltico de Petróleo CAP | 39 |
| 3.2 Métodos | 41 |
| 3.2.1 Caracterização Física Dos Materiais | 42 |
| 3.2.1.1 Agregados..... | 42 |
| 3.2.1.2 Cimento Asfáltico de Petróleo CAP..... | 44 |
| 3.2.2 Ensaio de Viscosidade Saybolt-Furol | 44 |
| 3.2.3 Dosagem das Misturas em Estudo..... | 45 |
| 3.2.3.1 Misturas Asfálticas..... | 45 |
| 3.2.4.1 Ensaio Marshall | 49 |
| 3.2.5 Ensaio de Características Mecânica das Misturas Asfálticas..... | 53 |
| 3.2.5.1 Ensaio de Resistência à Tração RT..... | 53 |
| 3.2.5.2 Ensaio de Resistência ao Dano pela Umidade Induzida em Misturas Betuminosas – Lottmann | 55 |
| 3.2.5.3 Módulo de Resiliência..... | 58 |
| 4.0 Resultados | 60 |
| 4.1 Cal Hidratada..... | 60 |
| 4.1.2 Temperatura de Trabalho..... | 61 |
| 4.2 Dosagem das Misturas | 62 |
| 4.2.1 Metodologia Marshall..... | 62 |
| 4.2.1.1 Dosagem das Misturas | 63 |
| 4.3 Características Mecânicas das Misturas | 66 |
| 4.3.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral | 66 |
| 4.3.2 Ensaio de Resistência ao Dano pela Umidade Induzida em Misturas Betuminosas –Lottmann | 67 |
| 4.3.3 Modulo de Resiliência..... | 69 |
| 5.0 Conclusão e Sugestão..... | 71 |
| Referências Bibliográficas | 73 |
| Anexos..... | 78 |

CAPÍTULO 01

1.0 INTRODUÇÃO

Com a necessidade de vencer longas distâncias em períodos de tempo menores, o uso do transporte modal aéreo vem apresentando um expressivo crescimento. De acordo estimativa de 2008 (IBGE, 2008), o Brasil apresenta cerca de 189,6 milhões de habitantes, distribuídos irregularmente sobre 8.511.965 quilômetros quadrados de continente. O país é dotado de uma malha rodoviária mal conservada, com ferrovias escassas e uma rede fluvial de baixa utilização, o que torna o modal aéreo uma alternativa relevante de deslocamento e, às vezes, a única de acesso a determinadas regiões.

Segundo a ANAC (2008), na região Nordeste existe 144 aeródromos, entre públicos e militares. Com o crescimento nessa modalidade de transporte torna-se necessário que os aeródromos apresentem uma maior vida útil e melhor desempenho nas características físicas e mecânicas dos revestimentos utilizados.

Segundo Bezerra Neto (2004), a granulometria dos agregados é um dos elementos que exerce grande influência no comportamento das misturas asfálticas, visto que ela afeta quase todas as propriedades físicas e mecânicas da mistura. A escolha adequada da granulometria da mistura pode prover um bom comportamento mecânico, principalmente em relação à deformação permanente, trincamento e outras patologias prematuras.

Segundo Roberts et al. (1996), são as propriedades físicas dos agregados que determinam principalmente a adequação para o uso em misturas asfálticas e, em menor extensão, as propriedades químicas, pois essas têm pequenos efeitos sobre o desempenho da mistura, salvo quando afetam a adesividade do ligante asfáltico ao agregado e a compatibilidade com o aditivo (dope) que pode ser incorporado ao ligante.

Devido ao baixo investimento na infra-estrutura aeroviária no país, suas normas apresentaram poucas modificações, a respeito das misturas asfálticas para revestimento em aeródromos. Diante deste cenário e sabendo-se da importância do papel da composição granulométrica das misturas nas características físicas e mecânicas das mesmas, foi desenvolvida esta pesquisa visando-se analisar a variação das propriedades de algumas misturas betuminosas usinadas a quente, influenciadas pela granulometria dos agregados, situadas próximos dos limites da Faixa 2 preconizada pela aeronáutica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 GERAL

Estudar a influência da granulometria dos agregados dentro de uma mesma faixa, a Faixa 2 adotada pela Aeronáutica, sobre as características volumétricas e mecânicas das misturas betuminosas para revestimentos de pistas de aeródromos.

1.1.2 ESPECÍFICOS

- Determinar a variação média do teor de projeto do ligante em função da granulometria dos agregados.
- Determinar a granulometria que mais pode ocasionar patologias prematuras ao revestimento;
- Determinar a variação média do módulo de resiliência, da faixa em estudo;
- Propor alterações nos intervalos da Faixa 2 da Aeronáutica, caso a pesquisa aponte para essa necessidade.

1.1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O texto desta Dissertação encontra-se em um volume distribuído da seguinte forma:

O Capítulo 1 trata da Introdução, Objetivos e Organização do Trabalho – são descritas uma visão geral do trabalho com a introdução, os objetivos a serem alcançados e a forma da organização do trabalho.

No Capítulo 2 estão a Fundamentação Teórica – são discutidos e descritos assuntos relacionados aos pavimentos de aeroportos, no que se refere ao estudo das propriedades das misturas asfálticas, com ênfase aos métodos de dosagem para misturas asfálticas, como por exemplo, o método Marshall, bem como a influência da granulometria da mistura no seu comportamento mecânico.

O Capítulo 3 apresenta os Materiais e Métodos empregados. Nele são relatados aspectos considerados importantes acerca dos procedimentos dos ensaios e o método da pesquisa, enquanto que no Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a fase experimental, à luz da revisão bibliográfica.

Finalmente, no Capítulo 5 estão as principais conclusões e são propostas sugestões para futuras pesquisas sobre o tema estudado.

Além dos capítulos anteriores, na seqüência são apresentadas as Referências bibliográficas consultadas e os Anexos, contendo as planilhas dos ensaios realizados.

CAPÍTULO 2

2.0 FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS

2.1 PAVIMENTOS DE AEROPORTOS

As misturas betuminosas são constituídas de ligante asfáltico e agregados minerais e têm o seu comportamento afetado tanto pelas propriedades individuais destes componentes quanto pela relação entre eles (MOTTA et al., 1996). Os ligantes, que podem ser de cimento asfáltico ou cimento asfáltico modificado (com a adição de modificadores como polímeros e borracha), atuam como elementos de ligação dos agregados e como agente impermeabilizante, englobando as partículas minerais e formando uma massa coesa. Os agregados, independente da fonte, método de processamento ou mineralogia, devem ser resistentes (duros e duráveis) e resistir aos esforços e abrasão decorrentes de aplicação de cargas repetidas.

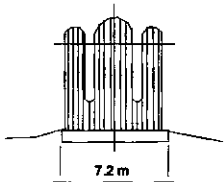
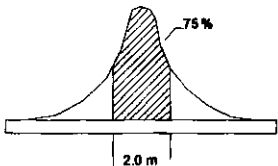
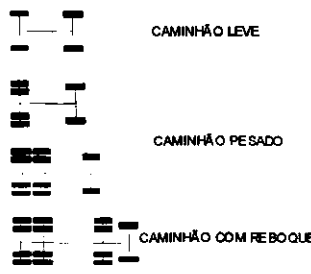
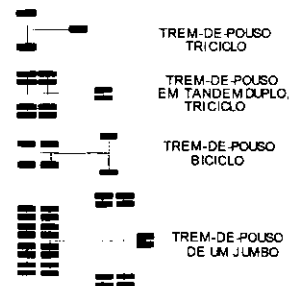
Segundo Medina (1997), as diferenças entre os pavimentos de aeroportos e os pavimentos rodoviários se concentram nas características físicas e geométricas das solicitações dos veículos, cargas mais pesadas e menor número de solicitações que ocorrem nas pistas dos aeródromos. Assim como para as rodovias, as quais dispõem de vários órgãos nacionais e internacionais (DNIT, DER's, AASHTO) responsáveis por estabelecerem critérios e parâmetros para suas misturas asfálticas, para os aeródromos pode-se citar a FAA (Federal Aviation Administration), UFGS-02749 e aeronáutica, como órgãos responsáveis por estabelecer critérios para o projeto de suas misturas asfálticas. A Tabela 2.1 mostra as principais diferenças entre os pavimentos de rodoviários e aeroportuários .

Os pavimentos de aeroportos são construídos para suportar as cargas impostas pelas aeronaves, devendo apresentar um bom desempenho, sendo estáveis e resistentes às intempéries. A camada de revestimento pode ser de Concreto Asfáltico Usinado a Quente, Concreto de Cimento Portland, e Pré-misturado a frio, dependendo do tráfego e da aeronave de projeto (MERIGHI & FORTES,2006).

O dimensionamento de aeródromos pode apresentar como aeronaves de projeto até três tipos distintos para o seu dimensionamento, sendo: i) uma para o dimensionamento estrutural da pista de pouso e decolagem, se for construída em pavimento flexível; ii) uma para o "táxi way" ou pátio de embarque e desembarque de passageiros e cargas, construída em pavimento rígido; e, iii) uma terceira, aeronave para o projeto geométrico do aeródromo.

O método de dimensionamento FAA assume como carga de solicitação 95% do peso máximo da aeronave na decolagem, e baseia-se no método do CBR, para dimensionamento dos pavimentos flexíveis, e na teoria de Watergaard, para pavimentos rígidos.

Tabela 2.1 – Diferenças entre pavimento rodoviário e de aeroporto (Adaptado de: MEDINA, 1997).

| CARACTERÍSTICAS | RODOVIAS | AERÓDROMOS |
|--|---|---|
| LARGURAS DAS PISTAS | 7 a 10m | 20 a 60m (táxis: 10 a 25m) |
| COMPRIMENTO | vários quilômetros | até cerca de 3000m |
| CARGAS | 10tf por eixo, veículo 40tf máximo | 100tf ou mais por trem-de-pouso principal, aviões de até 400tf |
| FREQÜÊNCIA DE REPETIÇÃO DE CARGAS | por exemplo: 2000 por dia: vários milhões na vida de serviço (o efeito da fadiga dos materiais de pavimento é importante) | pequena, por dia: 50 a 100; menos de 100.000 na vida de serviço |
| PRESSÃO DOS PNEUMÁTICOS | 1,5 a 7 kgf/cm^2 (0,15 a 0,60MPa) | 10 a 30 kgf/cm^2 (1,0 a 3,0MPa) |
| DISTRIBUIÇÃO TRANSVERSAL DE CARGAS NAS PISTAS |  <p>(não se faz diferenciação transversal praticamente)</p> |  <p>(diferencia-se o dimensionamento transversalmente)</p> |
| DISTÂNCIA DE DRENAGEM | pequena (3m) | grande (10 a 50m) |
| IMPACTO DE VEÍCULO NO PAVIMENTO | pequeno | grande no pouso, porém minorado pela sustentação e amortecimento |
| AÇÃO DE CARGA DINÂMICA (VIBRAÇÕES) DE VEÍCULOS PARADOS | não considerada | é importante nas cabeceiras das pistas, na decolagem e nas pistas de táxi |
| AÇÃO DE FRENAGEM | não é relevante; nas ruas, sim, nos sinais luminosos (semáforos) | importante quando do acionamento do motores, com as rodas do trem-de-pouso travadas, antes da decolagem |
| GEOMETRIA DE RODAS |  <p>CAMINHÃO LEVE CAMINHÃO PESADO CAMINHÃO COM REBOQUE</p> |  <p>TREM-DE-POUSO TRICICLO TREM-DE-POUSO EM TANDEM DUPL. TRICICLO TREM-DE-POUSO BICICLO TREM-DE-POUSO DE UM JUMBO</p> |
| | outros | |

Cabe ressaltar que esta pesquisa está focada apenas no estudo do revestimento, o CBUQ, não sendo abordados aspectos relacionados ao dimensionamento do pavimento para aeródromos, sabendo-se que a espessura do revestimento é especificada de acordo com o tipo da aeronave de projeto.

No Brasil, as especificações dos revestimentos de concreto asfáltico são estabelecidas pela Aeronáutica, tendo a INFRAERO como órgão fiscalizador das obras de infra-estruturas aéreas.

De acordo com as especificações da Aeronáutica, as misturas asfálticas projetadas para aeródromos têm que atender aos critérios mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Especificação da Aeronáutica para Misturas Asfálticas de Aeródromos (Norma NSMA 85-2).

| CARACTERÍSTICAS | CAMADA SUPERFICIAL | | | BINDER | | |
|--|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | TIPO A | TIPO B | TIPO C | TIPO A | TIPO B | TIPO C |
| ESTABILIDADE MÍNIMA (Newton) | 8000 | 4450 | 2225 | 8000 | 4450 | 2225 |
| FLUÊNCIA MÁXIMA (mm) | 10-14 | 10-18 | 10-18 | 10-14 | 10-18 | 10-18 |
| VAZIOS DA MISTURA (Vv%) | 3-5 | 3-5 | 4-6 | 5-7 | 5-7 | 4-6 |
| RELAÇÃO BETUME VAZIOS | 70-80 | 75-82 | 65-75 | 50-70 | 65-72 | 65-75 |
| MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA (golpes em cada face) | 75 | 75 | 50 | 75 | 75 | 50 |

Fonte : Norma NSMA 85-2

As misturas devem atender ainda aos valores mínimos de vazios do agregado mineral (VAM), segundo o tamanho máximo do agregado, apresentado na Tabela 2.3, conforme apresentado a seguir:

Tabela 2.3 Valores mínimos do VAM, segundo o tamanho máximo do agregado utilizado na mistura.

| Tamanho máximo do agregado (mm) | VAM (%) |
|------------------------------------|---------|
| 12,5 | 16 |
| 19,0 | 15 |
| 25,0 | 14 |
| 31,3 | 13 |

Observações:

- a) Nos revestimentos destinados a operação de aeronaves de massa bruta superior a 30.000 kg ou dotadas de pneus de pressões superiores a 700 kPa, a mistura asfáltica deve satisfazer aos requisitos do Tipo "A".
- b) Nos revestimentos destinados a operações de aeronaves de massa bruta inferior a 30.000 kg, mas igual ou superior a 15.000 kg, e dotadas de pneus de pressões iguais ou inferiores a 700 kPa, a mistura asfáltica deve satisfazer aos requisitos do Tipo "B".
- c) Nos revestimentos destinados a operações de aeronaves de massa bruta inferior a 15.000 kg, mas superior a 6.000 kg, e dotadas de pneus de pressões inferiores a 700 kPa, a mistura asfáltica deve satisfazer aos requisitos do Tipo "C" (Norma NSMA 85-2).

2.2- DOSAGENS DE MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas vêm sendo utilizadas nas construções de rodovias e aeródromos desde o começo do século 20, quando o asfalto manufaturado passou a ser mais disponível. Assim, com a maior utilização desse material na preparação de misturas asfálticas, começaram a aparecer os interesses e preocupações dos engenheiros para o desenvolvimento de metodologias de dosagem e especificações, de forma que se pudesse construir aeródromos e rodovias a um menor custo (SENÇO, 2001).

Dosar uma mistura asfáltica significa estabelecer proporções de agregados e ligante, que quando misturadas satisfaçam aos requisitos estabelecidos pelas especificações. Assim como em rodovias, os pavimentos dos aeródromos podem ser projetados de acordo com dosagens que utilizam as mesmas metodologias das misturas rodoviárias, respeitando-se as diferenças existentes nas especificações.

O primeiro procedimento de dosagem documentado para misturas asfálticas é conhecido como método Hubbard-Field. Esse método foi originalmente desenvolvido para dosagem de misturas de areia-asfalto, sendo depois modificado para aplicação em misturas com agregados graúdos (ASPHALT INSTITUTE, 1965 apud ROBERTS et al., 2002). Existem outros métodos onde cada um possui critérios próprios que objetivam o estabelecimento de relações entre ensaios de laboratório e os resultados obtidos no campo, são eles:

- método Hveem;
- método Marshall;
- método Triaxial de Smith;
- método SUPERPAVE.

No Brasil tem-se utilizado principalmente o método Marshall, ou suas alterações, com uma maior intensidade enquanto o método SUPERPAVE ainda vem sendo utilizado de forma tímida sendo utilizado de forma mais expressiva no meio acadêmico.

A metodologia SUPERPAVE também vem sendo pesquisada para a sua utilização nos projetos de misturas asfálticas de aeródromos (BUNCHER & DURVA, 2003).

2.2.1- PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS DAS MISTURAS

Uma mistura betuminosa é constituída geralmente por agregados graúdos, miúdos, material de preenchimento, filer, e cimento asfáltico. O esqueleto mineral da mistura é constituído pelos agregados, cuja função é suportar e transmitir as cargas aplicadas pelo tráfego na superfície do pavimento, enquanto que o cimento asfáltico por ser um material que apresenta características aglutinantes, tem a função de unir as partículas dos agregados e as manter na posição adequada para transmitir os esforços aplicados pelas cargas atuantes às camadas inferiores. A relação massa-volume numa mistura betuminosa compactada pode ser representada esquematicamente conforme esquematizado na Figura 2.1

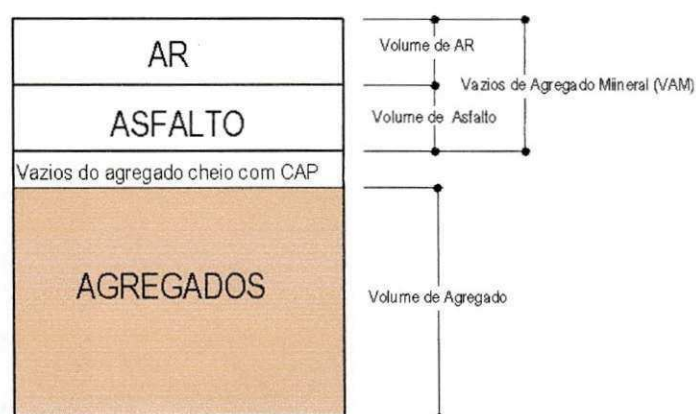


Figura 2.1 – Ilustração da volumetria numa mistura asfáltica.

2.2.1.1 Massa Especifica Máxima Teórica das Misturas Asfálticas (DMT)

Segundo Roberts et al., (1996), a DMT é numericamente igual à razão entre a massa do agregado mais ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos com asfalto e total, de acordo com a ilustração mostrada na Figura 2.2.

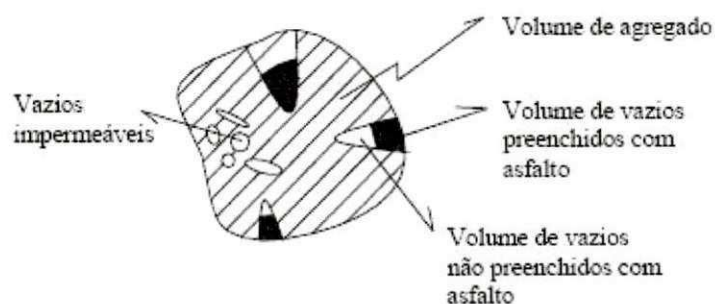


Figura 2.2 – Ilustração da DMT para misturas asfálticas [Bernucci et al., 2007].

O conhecimento da DMT é necessário para os cálculos dos parâmetros de percentual de vazios de misturas asfálticas compactadas, absorção de ligante pelos agregados, massa específica efetiva do agregado, teor de asfalto efetivo da mistura asfáltica e, ainda, para fornecer valores alvo para a compactação de misturas asfálticas através do compactador giratório. Outra utilização da DMT é na determinação da massa específica de misturas asfálticas já compactadas em campo. Juntamente com a espessura do pavimento, a DMT é necessária para que se estime a massa específica da mistura, sem extração de corpos-de-prova, através do método nuclear

A Massa Específica Máxima das misturas asfálticas pode ser determinada empregando-se três procedimentos:

- ponderação das massas específicas reais;
- ASTM D 2041, utilizando vácuo;
- método do querosene..

2.2.1.2 Ponderação das Massas Específicas Reais

A determinação da DMT é comumente realizada através de uma ponderação das massas específicas reais dos materiais que constitui a mistura asfáltica. As massas específicas dos agregados são determinados segundo normas do DNIT para agregado graúdo (DNIT-ME 81/98) e agregado miúdo (DNIT-ME 84/95). Com os correspondentes valores das massas específicas reais de todos os materiais e suas respectivas proporções, faz-se uma ponderação para a determinação da DMT da mistura para os diferentes percentuais de ligante. A equação 2.0 apresenta o cálculo da DMT pelo método da ponderação das Massas Específicas Reais.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%lig}{D_{lig}} + \frac{\%b}{D_b} + \frac{\%c}{D_c} \dots \frac{\%f}{D_f}} \quad [2.0]$$

Onde:

%Lig , %b, %c , %f = Porcentagem dos materiais utilizados na confecção da mistura;

Dlig, Db, Dc, Df, = Massas Específicas Reais dos materiais utilizados na mistura;

A determinação da DMT através da equação 2.0 é influenciada pelo modo de determinação das massas específicas reais dos materiais granulares, através da utilização das normas da ASTM ou DNIT.

Segundo Leahy & Mcgennis (1999), a equação 2.0 foi inicialmente apresentada no primeiro manual de dosagem do Instituto do Asfalto. Nessa publicação, é facultada ao projetista a escolha da densidade dos agregados que deverá ser utilizada (aparente, real ou efetiva). Apesar de conveniente, o uso da densidade aparente resulta em um teor de vazios inferior ao real, visto que não é levada em consideração a absorção do asfalto. A adoção da

massa específica real também apresenta valores de vazios errôneos (superiores). Neste caso, é admitido que a absorção de asfalto seja igual à absorção de água.

2.2.1.3 Massas Específicas Máxima Medida (Gmm) procedimento da ASTM D 2041 utilizando vácuo

A determinação da Gmm através do vácuo é empregada em projetos de misturas asfálticas dos Estados Unidos, Canadá (Instituto de Asfalto, 1989), África do Sul (Jooste, 2000), Austrália (APRG, 1997) e Europa (Heide, 2003). A DMT pode ser obtida em laboratório, empregando-se os métodos de ensaios norte-americanos ASTM D 2041 (2000) e da AASHTO T 209 (1999) ou o método europeu EN 12697-5.

Para a realização do ensaio, pesa-se, inicialmente, 1500g da mistura (para tamanho máximo nominal de até 12,5 mm) em um recipiente metálico de peso conhecido. Em seguida, este é preenchido com água a 25°C até que toda a mistura fique submersa. Em seguida, é aplicada uma pressão residual no recipiente de 30mmHg (diferença entre 760mm e 730mm), por um período de 15 minutos, a fim de expulsar os vazios existentes entre os filmes de ligante, conforme ilustrado na Figura 2.3.

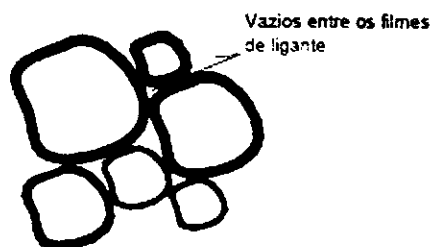


Figura 2.3 – Ilustração dos vazios existentes entre os agregados recobertos ou entre os grumos [Bernucci et al., 2007].

Logo após esse período, é restabelecida a pressão ambiente no recipiente metálico. Finalmente, o recipiente, juntamente com a mistura e a água, é pesado imerso. A DMT, conforme descrito, é determinada por:

$$Gmm = \frac{A}{A + B - C} \times 0,9971 \quad [2.1]$$

A = massa da amostra seca em ar (g);

B = massa do recipiente com volume completo com água, (g);

C = massa do recipiente + amostra submersa em água, (g).

Castelo Branco (2004) afirma que a vantagem do procedimento descrito é a obtenção da massa específica da mistura asfáltica sem a necessidade da obtenção das massas específicas dos seus constituintes separadamente, além de já considerar a absorção do ligante pelos agregados.

2.2.1.4 Massas Específicas Máxima Medida (Gmm) – procedimento com querosene

Castro Neto (1996) propõe um método alternativo para determinação da Gmm em que os vazios de ar são expulsos da mistura sem a utilização do vácuo. Neste método, é utilizado o querosene como diluente do asfalto. O método partiu da constatação experimental que esse produto é capaz de expulsar os vazios de ar de misturas, resultando na determinação de valores da densidade máxima, análogos àqueles obtidos com aplicação de vácuo. A motivação do referido autor deu-se devido à dificuldade da realização do ensaio com aplicação de vácuo em laboratórios instalados em obras.

A proposta de ensaio apresentada por Castro Neto (1996) é muito simples, de fácil execução e muito promissora para a simplificação dos métodos de dosagens de misturas betuminosas. O procedimento para a realização do ensaio laboratorial pelo método proposto por Castro Neto (1996) é descrito a seguir:

O procedimento inicia-se pela calibração de um picnômetro e determinação da massa específica do querosene a diversas temperaturas. É importante que o picnômetro apresente tampa de borracha, para evitar entrada da parte líquida entre a tampa e o picnômetro, e que dentro da borracha exista um orifício preenchido com vidro, para que a leitura seja realizada em uma marca de referência nesse vidro de diâmetro reduzido, conforme mostrado na Figura 2.4. Quanto menor o diâmetro, mais precisas serão as leituras, porém, é importante que o diâmetro permita a colocação do material líquido com uma pipeta.



Figura 2.4 – Tampa de borracha com orifício preenchido com vidro de diâmetro reduzido (VASCONCELOS et al., 2003).

Procedimento:

- determinar a massa do picnômetro (P);
- completar o picnômetro com querosene com auxílio do bquer e determinar a massa do picnômetro completo com querosene (P1) para temperaturas entre 10 e 35°C;
- determinar a massa do picnômetro completado com água destilada (P2) para temperaturas entre 10 e 35°C;
- adicionar aproximadamente 1 litro de querosene no picnômetro e determinar a massa do conjunto (P3) a qualquer temperatura;
- verter a mistura asfáltica lentamente dentro do picnômetro com querosene com o auxílio da espátula e funil. A quantidade mínima da amostra deve ser de 1.200g com diâmetro máximo de 19,1mm e sua temperatura deve estar próxima de 100°C;
- determinar a massa do conjunto (P4);
- realizar pequenos movimentos de rotação no conjunto e, logo após, agitar a amostra com uma haste para expulsão do ar existente nos vazios. Ao retirar a haste, limpá-la com a pisseta;
- completar o picnômetro com querosene, colocar a tampa e determinar a nova massa (P5);
- imediatamente após a determinação da massa (P5), agitar a mistura e determinar sua temperatura t com precisão de 0,5°C. É conveniente que a temperatura esteja entre $\pm 5^\circ\text{C}$ em relação à temperatura ambiente.

Após o procedimento descrito acima é possível calcular a massa específica máxima da mistura, $MEM(t)$, a uma dada temperatura através da equação 2.2.

$$MEM(t) = \frac{(P_4 - P_3) \times (P_1 - P)}{(P_4 + P_1 - P_5 - P_3) \times (P_2 - P)} \quad [2.2]$$

A determinação da massa específica máxima a 25°C, $MEM(25^\circ\text{C})$, é dada por:

$$MEM(25^\circ\text{C}) = \frac{MEM(t)}{\left[1 + (3,783 \times 10^{-5} \times (25 - t))\right]} \quad [2.3]$$

Para a utilização desta fórmula, Castro Neto (1996) admitiu que a variação volumétrica por cm^3 por $^\circ\text{C}$ de uma amostra com 5% de ligante seja de $3,783 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$, conforme ASTM D 2041-94. A DMT no ensaio, denominada G_{mm} , é obtida pela seguinte equação:

$$G_{mm} = \frac{MEM(25^\circ\text{C})}{0,9971} \quad [2.4]$$

Castro Neto (1996) verificou que durante a execução dos ensaios o querosene desestrutura qualquer grumo de ligante e agregado, fazendo com que a quase totalidade dos vazios seja expulsa logo no primeiro contato entre estes constituintes. Isso pode ser explicado também pelo fato da temperatura de execução do ensaio chegar próximo de 100°C, facilitando essa desestruturação. Esse é um fato relevante, pois se esse fenômeno realmente acontece, está se incorrendo na mesma inconsistência da determinação da DMT pela ponderação das massas específicas reais. A total desestruturação dos grumos fará com que os vazios permeáveis existentes entre agregado e ligante, sejam preenchidos com querosene, modificando assim o volume considerado na determinação da massa específica máxima.

2.2.2 PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS

O valor da massa específica máxima da mistura asfáltica influencia outros parâmetros volumétricos que são utilizados para escolha do teor de projeto de uma mistura, quais sejam:

- porcentagem de vazios da mistura;
- vazios preenchido com asfalto;
- porcentagem de vazios do agregado mineral (VAM);
- relação betume vazios.

2.2.2.1 Porcentagem de Volume de Vazios (%V)

É definido como o volume de vazios existente na mistura, expresso como a porcentagem do volume total da mistura calculado em função da DMT e a massa específica aparente da mistura, segundo a equação 2.5.

$$\%V = \frac{DMT - d}{d} \quad [2.5]$$

Onde:

- %V = Porcentagem Vazios da Mistura;
- DMT = Massa Específica Máxima Teórica;
- d = Massa aparente da mistura asfáltica.

2.2.2.2 Vazios Preenchidos com Asfalto (VCB)

Conhecido também como vazios cheios de betume é uma relação, expressa em porcentagem, entre o volume ocupado pelo asfalto e os vazios totais presentes na mistura, sendo determinado através dos valores de teor de asfalto da mistura, da massa específica real da mistura compactada e sua massa específica aparente.

$$VCB = \frac{d \times \%L}{\gamma_{lig}} \quad [2.6]$$

Onde:

- VCB = Porcentagem Vazios Preenchido com asfalto;
 %L = Porcentagem de ligante na mistura;
 d = Massa aparente da mistura asfáltica;
 γ_{lig} = Massa Especifica Real do Ligante.

2.2.2.3 Relação Betume-Vazios (RBV)

É a relação entre a porcentagem de vazios preenchidos de asfalto e a porcentagem de vazios do agregado mineral (PINTO, 2004), conforme equação 2.7.

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \times 100 \quad [2.7]$$

Onde:

- RBV = Relação Betume Vazios (%);
 VCB = Porcentagem Vazios Preenchido com asfalto (%);
 VAM = Vazios do Agregado Mineral (%).

O valor dos Vazios Preenchido com asfalto (VCB), via de regra, apresenta o seguinte comportamento nas misturas asfálticas: seus valores crescem com a quantidade de ligante na mistura, até certo teor de ligante. Depois disso, ao se adicionar mais de ligante, dependendo da mistura, a RBV apresenta um pequeno crescimento do seu valor. Através do traçado da curva relacionando os valores da RBV versus o teor de ligante, nota-se a tendência da RBV gerar uma assintota paralela ao eixo das abscissas (% ligante).

2.2.2.4 Porcentagem de Vazios do Agregado Mineral (VAM)

A função dos Vazios do Agregado Mineral (VAM) no processo de dosagem de misturas asfálticas tem mudado desde sua introdução como critério de projeto dessas. Inicialmente, alguns projetistas tentaram minimizar o VAM para aumentar a estabilidade das misturas. Outros alteravam o VAM na tentativa de garantir a durabilidade da mistura. Na década de 1950, o VAM era um parâmetro periférico e não muito enfatizado, a ponto do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos especificar valores para a Relação Betume-Vazios (RBV), em projetos de misturas Marshall, mas não para o VAM (FERNANDES JR & GOUVEIA, 2006).

Os Vazios dos Agregados Minerais representam o que não é agregado numa mistura. Sendo seu valor mínimo estabelecido de acordo com o tamanho máximo do agregado utilizado no projeto da mistura. O VAM pode ser determinado pela soma dos vazios da mistura mais os vazios ocupados pelo ligante (VCB).

$$VAM = V + VCB \quad [2.8]$$

Onde:

VAM = Vazios do Agregado Mineral (%);

%V = Porcentagem Vazios da Mistura;

VCB = Porcentagem Vazios Preenchido com asfalto (%);

Segundo Fernandes Jr & Gouveia (2006), o VAM pode ser influenciado por diversos fatores, destacando-se:

- características de superfície do agregado, como forma, angularidade e textura superficial;
- arranjo entre partículas e grau de compactação;
- granulometria;
- proporção entre agregados grossos e finos na mistura;
- proporção e características superficiais dos agregados finos;
- teor de filler.

2.3 DOSAGEM MARSHALL

Com a 2ª Guerra Mundial, o "U.S Corps of Engineers" deparou-se com o problema de projeto e construção de aeroportos militares em todas as frentes de batalha.

O U.S Corps of Engineers não tinha um tipo de ensaio simples nem esquemas de trabalhos para projetos e controle de campo para pavimentos betuminosos. Carecia também de um critério para a determinação do teor de projeto de betume para as misturas asfálticas a serem submetidas às solicitações das cargas interpostas pelas aeronaves e pelos veículos militares.

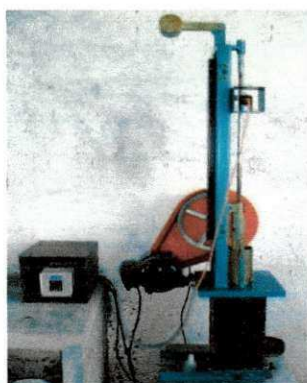
Os estudos serviam também para determinar um método de compactação em laboratório, cujos valores da massa específica fossem comparáveis com as obtidas em campo e estabelecesse critérios para o projeto de misturas asfálticas.

O ensaio Marshall foi desenvolvido em 1939 pelo Departamento de Estradas e Rodagem do estado do Mississippi (E.U.A.), por Bruce Marshall, com o objetivo de determinar um método de compactação em laboratório eficiente. Assim foi necessário construir um grande número de pistas experimentais, nas quais variavam a porcentagem

de asfalto, a granulometria do agregado e as cargas. Desse estudo, o U.S Corps of Engineers estabeleceu critérios levando em conta a estabilidade da mistura, massa específica aparente, vazios preenchidos e não preenchidos, além da fluência, obtidos através do ensaio Marshall, para determinação do teor de projeto do ligante (SENÇO, 2001).

No ensaio Marshall, os corpos-de-prova são compactados por impacto, através da utilização do compactador Marshall, que pode ser manual ou mecânico, conforme mostrados nas Figuras 2.5 (a), (b) e 2.6 (a), (b).

Devido à grande variabilidade nos valores dos parâmetros físicos dos corpos-de-prova, pesquisadores, Motta (1996), Fernandes Jr & Gouveia (2006) recomendam que, para garantir maior uniformidade entre os resultados de dosagem Marshall, deve-se estipular o tempo de compactação quando da utilização de compactação manual, e utilizar-se sempre que possível a compactação automática para eliminar a possível interferência ocasionada pelo ritmo de compactação imposto pelo operador.



(a)



(b)

Figura 2.5 - Equipamentos utilizados para realização da compactação dos corpos-de-prova automático[(a) Compactador automático (b) Soquete + Cilindro].



(a)



(b)

Figura 2.6 - Equipamentos utilizados para realização da compactação dos corpos-de-prova manual[(a) Compactador manual (d) Soquete + Cilindro].

De acordo com Coelho (1992), a variabilidade nos valores dos parâmetros físicos dos corpos-de-prova (massa específica, volume de vazios e relação betume vazios), inerente ao ensaio Marshall, é relativamente baixa nas misturas para concreto asfáltico. Por outro lado, as dispersões geralmente encontradas nos parâmetros de resistência mecânica da mistura, avaliados através da estabilidade e da fluência Marshall são mais significativas. Aquele autor indica que os fatores que influenciam nos resultados do método Marshall são:

- tempo de mistura dos diversos materiais envolvidos, insuficiente para obtenção de misturas realmente homogênea;
- compactação ineficiente e em desigualdade de condições;
- controle ineficiente de temperatura dos materiais envolvidos.

Motta (1998) faz importante comentário acerca da pouca representatividade do método de compactação em relação ao campo. No desenvolvimento da metodologia Marshall, a compactação manual foi à única utilizada. Ao longo dos anos foi desenvolvida a compactação automática, poupando o esforço do operador e também evitando a influência operacional durante a aplicação dos golpes. No entanto, já foi constatado que geralmente os corpos-de-prova compactados manualmente proporcionam uma maior densidade, quando comparados com os corpos-de-prova compactados automaticamente.

A AASHTO recomenda que ao se usar a compactação automática, os resultados sejam comparados e calibrados com os resultados obtidos com a compactação manual (KANDHAL & KOEHLER, 1985).

De acordo com Aldigueri et al (2001), foi observado que corpos-de-prova compactados automaticamente apresentavam um menor volume de vazios (V_v) e, conseqüentemente, menores densidades se comparados à compactação manual. Sendo os parâmetros volumétricos elementos decisivos na escolha do teor ótimo de ligante (ou teor de projeto) nas misturas asfálticas, tais variações podem resultar na determinação de dois teores diferentes para a mesma mistura asfáltica, dependendo do tipo de compactação empregada.

Sua finalidade é obter o teor ideal que fornecerá uma maximização dos efeitos de estabilidade, porcentagem de vazios, fluência e resistência para misturas betuminosas.

A partir de estudos realizados por Rodrigues & Melo (2008), que abordaram o efeito dos processos de compactação automática e manual nas características mecânicas de misturas betuminosas, foi observado que os corpos-de-prova compactados manualmente tendem a apresentar maiores valores de estabilidade Marshall, em comparação com os corpos-de-prova compactados automaticamente. Isto corrobora conclusões de outros estudos como os realizados por Coelho (1992), Aldigueri (2001), os quais têm revelado que a densidade dos CPs compactados manualmente apresenta valores mais elevados que a de corpos de prova compactados em soquetes elétricos.

Hills (1973), apud Amaral (2000), relata que uma das propriedades mais importantes de uma mistura asfáltica é a sua estabilidade, ou seja, a habilidade desta em resistir à deformação permanente quando sujeita à passagem dos veículos, ou mesmo quando sujeita aos veículos estacionados. Contudo, ensaios laboratoriais, como o Marshall, idealizados para medir a estabilidade destas misturas, são empíricos em sua essência.

Leal & Castro (2004) descrevem que apesar do método de estabilidade Marshall ser contestada por alguns autores, em virtude da dispersão de seus resultados e do confinamento do corpo-de-prova, a estabilidade é um dos parâmetros mais utilizados para dosagem e controle de qualidade das misturas asfálticas.

2.4 MÉTODO DE DOSAGEM SUPERPAVE

Durante a década de 80, várias rodovias americanas de tráfego pesado passaram a evidenciar deformações permanentes prematuras, que foram atribuídas ao excesso de ligante nas misturas. Muitos engenheiros acreditavam que os impactos na compactação das misturas durante a dosagem Marshall produziam corpos de prova (CP) com densidades que não condiziam com as densidades do pavimento em campo. Este assunto foi abordado no estudo realizado nos EUA sobre materiais asfálticos, denominado Strategic Highway Research Program (SHRP), que resultou em um novo procedimento de dosagem, especificação e seleção de ligante denominado SUPERPAVE (SUPERior PERFORMANCE asphalt PAVEMENTS - Pavimentos Asfálticos de Desempenho Superior). Esta metodologia especifica os materiais, projeto e análises das misturas asfálticas e prevê o desempenho de pavimentos. A metodologia inclui equipamentos de ensaios, métodos e critérios. A aplicação do sistema SUPERPAVE depende do volume de tráfego ou de outra forma de classificação funcional da rodovia. Foram desenvolvidos três níveis de projeto de misturas:

- i) O nível 1 - para tráfego com carga de eixo equivalente (ESAL - Equivalent Axle Loads) abaixo de 10^6 . É requerido apenas projeto volumétrico. Engloba moldagem de corpos-de-prova usando o Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS) e a seleção do teor de ligante é baseado na % de vazios (V_a), nos vazios do agregado mineral (VAM), na % de vazios preenchido com asfalto e razão filer/asfalto.
- ii) O nível 2 - para tráfego com ESAL entre 10^6 e 10^7 . Usam-se o projeto volumétrico como ponto de partida e uma bateria de testes com os equipamentos: Analisador de Cisalhamento SUPERPAVE (SUPERPAVE Shear Tester - SST) e Analisador de Tração Indireta (Indirect Tensile Tester - IDT). Estes são testes de predição de desempenho.
- iii) O nível 3 - para tráfego com ESAL acima de 10^7 . Engloba os passos dos níveis 1 e 2 e testes adicionais com o SST e IDT em uma faixa mais ampla de temperatura e ensaios com corpos-de-prova confinados (Testes de Predição Estendidos). A previsão de desempenho do nível 3 é mais confiável, pois se baseia num grupo de ensaios maior (LEITE et. al, 1996).

Segundo, Marques (2004) os critérios puramente volumétricos não garantem que o teor "ótimo" corresponda necessariamente ao melhor teor para todos os aspectos do comportamento de uma mistura asfáltica dentro dos novos conhecimentos da mecânica dos pavimentos, que devem nortear a dosagem com a obtenção das características mecânicas da mistura em estudo. Reforça-se também a necessidade de explorar melhor a granulometria dos agregados disponíveis, além de se dosar cada mistura em função do CAP disponível e da estrutura na qual será empregada.

A dosagem SUPERPAVE em todos os seus níveis exige uma seleção dos materiais, onde são definidos o ligante asfáltico e os agregados a serem utilizados no projeto com base nos fatores ambientais e de tráfego, definidos para o projeto do pavimento em estudo. Seleciona-se o PG (Performance Grade) do ligante asfáltico requerido no projeto pelas condições climáticas e os agregados são selecionados com base no volume de tráfego e espessura de camada.

2.4.1 SELEÇÃO DOS AGREGADOS

Os pesquisadores da SHRP estabeleceram duas modalidades de propriedades para os agregados no SUPERPAVE, as propriedades de consenso e as propriedades de origem.

As propriedades de consenso, a seguir elencadas, são de extrema importância para o desempenho de uma "boa mistura" asfáltica, devendo satisfazer a todos os tipos de carregamentos leves e pesados:

- angularidade do agregado graúdo;
- angularidade do agregado miúdo;
- partículas planas e alongadas;
- teor de argila.

As propriedades de origem são aquelas dependentes da origem dos agregados e são também importantes para um projeto da mistura, mas valores limites não foram especificados por serem dependentes da fonte, não possuindo, portanto, valores limites de consenso. Cada departamento estabelece valores específicos e critérios de aceitação. Estas propriedades são:

- dureza;
- sanidade;
- materiais deletérios.

2.4.2 GRANULOMETRIA

Para especificar a granulometria, a metodologia SUPERPAVE usa uma modificação da maneira tradicional. Adotou-se uma técnica gráfica para especificar a distribuição dos diferentes tamanhos dos agregados em uma

mistura. A ordenada deste gráfico continua sendo a porcentagem passante. Já a abscissa é constituída por uma escala numérica da relação da abertura da peneira em questão sobre o diâmetro máximo do agregado elevado à potência de 0,45. Estes exemplos podem ser vistos na Figura 2.7, que representa este tipo de gráfico.

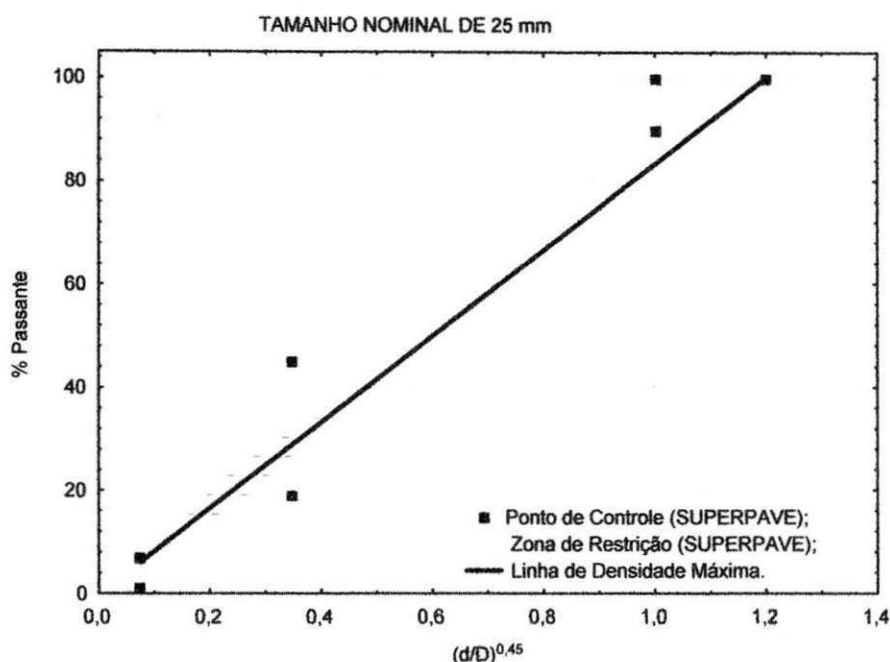


Figura 2.7 – Curva Fuller SUPERPAVE [Bukowki,1994].

No gráfico da Figura 2.7 também se traça a curva da granulometria correspondente à densidade máxima do material, constituída por uma linha reta que parte da origem e vai até o ponto de 100% referente ao agregado de tamanho máximo. O SUPERPAVE usa a seguinte definição para o tamanho dos agregados:

- o tamanho máximo: é o tamanho de peneira maior do que o tamanho nominal máximo;
- o tamanho nominal máximo: é o tamanho de peneira maior do que a peneira que retém mais que 10%.

O tamanho nominal máximo correspondente à primeira peneira que tiver mais de 90% passante. O tamanho máximo é, portanto, um tamanho de peneira acima. A granulometria de densidade máxima representa a granulometria em que os agregados se encaixam da forma mais compacta possível. Segundo o projeto SUPERPAVE, esta granulometria deve ser evitada, pois a distância entre os grãos seria tão pequena que não haveria espaço suficiente para formar um filme resistente de asfalto. Além de se evitar a granulometria de densidade máxima, o projeto de mistura SUPERPAVE apresenta dois critérios: os pontos de controle e a zona restrita. Os pontos de controle são pontos mestres (limites) por onde a curva granulométrica deve passar. Esses limites estão localizados no tamanho nominal máximo, no tamanho de 2,36 mm (peneira n° 8) e no tamanho de 0,075mm (peneira n° 200). A zona restrita encontra-se em torno da linha de densidade máxima entre as peneiras de abertura intermediárias de 2,36 mm ou 4,75 mm e a peneira com abertura 0,3 mm. Nessa região, segundo a metodologia, a granulometria da mistura deve ser evitada. Caso isto ocorra, a curva granulométrica é chamada

de "corcunda", e indica a presença de muita areia fina em relação à areia total, devendo ser evitada, por apresentar comportamento frágil, dificultando a compactação e oferecendo pouca resistência à deformação permanente durante a vida útil. Neste caso, também possuem esqueleto pétreo frágil, sendo dependentes da rigidez do ligante para terem resistência ao cisalhamento. Misturas assim obtidas apresentam muita sensibilidade ao teor de ligante, podendo facilmente se deformar.

Para atender aos requisitos SUPERPAVE em relação à granulometria, basta que a mistura de projeto passe pelos pontos de controle e evite a zona restrita. Existe uma recomendação, e não obrigação, que a granulometria passe abaixo da zona restrita e que à medida que o volume de tráfego aumenta, as granulometrias devem se aproximar dos pontos de controle inferiores. No entanto, já há muitos estudos mostrando que quando se utiliza areia artificial (pó-de-pedra) ou mesmo areia com angulosidade elevada, essa zona de restrição não se aplica (MOTTA et al., 1996).

O requisito para a granulometria é baseado nas quatro peneiras de controle: i) a peneira nominal máxima (tamanho de peneira superior a que apresentar mais de 10% em peso retido); ii) a peneira máxima (peneira imediatamente superior à nominal máxima); iii) a peneira de 2,36 mm e iv) a peneira de 0,075 mm (nº. 200). Nas Tabelas 2.4 e 2.5 estão reproduzidas as várias faixas de enquadramento de agregados e pontos de controle, bem como os limites da zona de restrição.

Tabela 2.4 – Pontos de Controle de acordo com o Tamanho Máximo do Agregado (SUPERPAVE).

| Abertura (mm) | Pontos de Controle | | | | | | | | | |
|------------------|--------------------------------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|--------|-----|
| | Porcentagem em massa, passando | | | | | | | | | |
| | 37,5 mm | | 25,0 mm | | 19,0 mm | | 12,5 mm | | 9,5 mm | |
| | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx |
| 50,0 | 100 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 37,5 | 90 | 100 | 100 | - | - | - | - | - | - | - |
| 25,0 | | 90 | 90 | 100 | 100 | - | - | - | - | - |
| 19,0 | - | - | - | 90 | 90 | 100 | 100 | | - | - |
| 12,5 | - | - | - | - | - | 90 | 90 | 100 | 100 | - |
| 9,5 | - | - | - | - | - | - | - | 90 | 90 | 100 |
| 4,75 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 90 |
| 2,36 | 15 | 41 | 19 | 45 | 23 | 49 | 28 | 58 | 32 | 67 |
| 0,075 | 0 | 6 | 1 | 7 | 2 | 8 | 2 | 10 | 2 | 10 |

Fonte: [Bukowki,1994].

Tabela 2.5 – Zona de Restrição de Acordo com o Tamanho Máximo do Agregado (SUPERPAVE).

| Abertura (mm) | Zona de Restrição SUPERPAVE | | | | | | | | | |
|------------------|--------------------------------|------|---------|------|---------|------|---------|------|--------|------|
| | Percentagem em massa, passando | | | | | | | | | |
| | 37,5 mm | | 25,0 mm | | 19,0 mm | | 12,5 mm | | 9,5 mm | |
| | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx |
| 4,75 | 34,7 | 34,7 | 39,5 | 39,5 | - | - | - | - | - | - |
| 2,36 | 23,3 | 27,3 | 26,8 | 30,8 | 34,6 | 34,6 | 39,1 | 39,1 | 47,2 | 47,2 |
| 1,18 | 15,5 | 21,5 | 18,1 | 24,1 | 22,3 | 28,3 | 25,6 | 31,6 | 31,6 | 37,6 |
| 0,60 | 11,7 | 15,7 | 13,6 | 17,6 | 16,7 | 20,7 | 19,1 | 23,1 | 23,5 | 27,5 |
| 0,075 | 10,0 | 10,0 | 11,4 | 13,7 | 13,7 | 13,7 | 15,5 | 15,5 | 18,7 | 18,7 |

[Bukowki,1994].

Sebaaly et al. (1997) realizam um interessante estudo com misturas contendo quatro diferentes graduações, sendo uma acima da zona de restrição (AZR), uma através da zona de restrição (TZR) e duas abaixo zona de restrição (BZR). Além dessa variação, os autores utilizaram quatro diferentes ligantes asfálticos e cinco tipos de agregados. A granulometria apontada com detentora do melhor comportamento mecânico ao término do estudo foi a TZR. Por outro lado, a que apresentou os piores resultados foi a AZR. Os critérios de eliminação das misturas foram baseados nos valores do módulo de resiliência, resistência à tração, deformação permanente e thermal stress-restrained specimen test (TSRST).

O trabalho realizado por Kandhal & Cooley Jr. (2002) contou com a investigação de cinco granulometrias (AZR, BZR, TZR e duas cruzando a ZR com descontinuidade entre as peneiras de 2,36 e 0,6 mm), dois agregados graúdos, dez agregados miúdos, dois tamanhos máximos nominais (9,5 e 19 mm) e três esforços de compactação (75, 100 e 125 giros do compactador giratório). As granulometrias que cruzam a ZR (CZR) representam granulometrias com uma descontinuidade entre as peneiras de 2,36 mm e 0,6 mm e geralmente apresentam baixa estabilidade. A maior quantidade de agregados miúdos em relação ao gráudo deve-se ao fato de que a ZR é aplicada às peneiras de agregados miúdos, de modo que a forma e a textura desse material passam a ser fatores importantes para o desempenho das misturas asfálticas. Segundo os autores, misturas que atendem aos requisitos Superpave e de angularidade da fração miúda, mas que violam a ZR, apresentam desempenho similar ou superior às misturas que têm granulometria fora da ZR. A utilização de agregados de alta angularidade leva a misturas resistentes à deformação permanente, mesmo que a distribuição granulométrica atenda ao critério adotado através da ZR.

Zhang et al. (2004) investigaram a distribuição granulométrica de quatro misturas que já haviam sido aplicadas em rodovias de alto volume de tráfego, no Alabama, todas elas passando abaixo da ZR (por ser uma exigência do departamento de transportes daquele Estado). Para cada uma dessas granulometrias foram montadas duas novas, sendo uma acima e outra através da ZR. As misturas foram analisadas através dos ensaios, Rotary

Loaded Wheel Tester (RLWT) e estabilidade e fluência Marshall. Os autores também apontam para a ineficiência da ZR, visto que as misturas que violaram a mesma tiveram desempenho semelhante ou superior às misturas que não violaram. Os autores citam ainda que misturas com granulometria BZR, que são comumente tidas como mais resistentes à deformação permanente, aparecem como mais sensíveis às propriedades dos agregados, que as misturas AZR e TZR.

Diante dos vários estudos realizados sobre a influência da ZR na característica das misturas, observou-se que a ZR é um fator que não apresenta muito efeito sobre o desempenho das misturas asfálticas. Ao passo que as características dos materiais utilizados, em especial os agregados, se constituem num fator preponderante no desempenho dessas misturas.

O SUPERPAVE também apresenta um requisito em relação à característica volumétrica dos Vazios de agregados minerais (VAM) de acordo com o tamanho máximo nominal. (A Tabela 2.6 mostra os valores mínimos dos VAM recomendados pelo SUPERPAVE).

Tabela 2.6 – Recomendação SUPERPAVE para Vazios de Agregado Mineral (SUPERPAVE).

| Tamanho Nominal Máximo do Agregado | VAM mínimo (%) |
|------------------------------------|----------------|
| 9,5 mm | 15,0 |
| 12,5 mm | 14,0 |
| 19 mm | 13,0 |
| 25 mm | 12,0 |
| 37,5 mm | 11,0 |

Segundo Hislop & Coree (2000), especificar um mínimo de vazios no agregado mineral (VAM) para misturas asfálticas baseado no tamanho máximo nominal pode ser irrealista, de forma que a granulometria e a textura da superfície dos agregados parecem ser os melhores indicadores de valores críticos de VAM.

O projeto de dosagem de Misturas Asfálticas utilizando a metodologia SUPERPAVE para aeroportos ainda está em fase de pesquisa. Nos EUA as pesquisas nesta área vêm sendo desenvolvidas utilizando mistura asfálticas com essa metodologia de dosagem, como por exemplo, na aplicação de um aeródromo militar em 1997, em uma pista da base da força aérea na Arkansas (DENNY, 1998).

A FAA aprovou em 1999 a aplicação da dosagem da mistura asfáltica para uma camada de um 5 cm de reforços do aeródromo de Griffin-Spalding, na Geórgia, com a mesma especificação do SUPERPAVE, para a mistura utilizada nas rodovias, onde foi comprovada a diminuição de algumas patologias tais como fissura, afundamento de trilho do revestimento (BUNCHER & DURVA, 2003).

Segundo Buncher & Durva (2003), a maior diferença entre os pavimentos aeroportuário e os rodoviários reside no fato de que os pavimentos para aeroportos tendem a ser mais propensos à oxidação causada pelos efeitos do tempo, exsudação e fissuras em bloco.

A introdução da metodologia SUPERPAVE na dosagem de misturas asfálticas para aeroportos ainda está sendo incorporada de forma bastante lenta, visto que essa metodologia foi desenvolvida com a ênfase na diminuição das deformações permanentes do revestimento. Isto se justifica levando-se em conta que a preocupação geral com os revestimentos dos aeródromos não é com as deformações permanentes, mas com o desgaste e deterioração longitudinais do revestimento asfáltico.

Segundo Buncher & Durva (2003), a FAA e o Instituto Militar Americano vêm adquirindo experiência com a dosagem de misturas asfálticas através da metodologia SUPERPAVE para aeródromos, tendo como principal finalidade adaptá-la e torná-la um padrão em projetos de misturas asfálticas para aeródromos.

2.4.3 COMPACTAÇÃO POR AMASSAMENTO

Segundo Harman et al. (2002), apud Marques (2004), o desenvolvimento do conceito da compactação giratória é atribuído aos engenheiros Philippi, Raines e Love, do Departamento de Rodovias do Estado do Texas, EUA, na década de 1930. O primeiro compactador giratório Texas era manual e foi usado em pesquisas de 1939 a 1946. Em 1939, esse Departamento iniciou pesquisas sobre projeto e controle de misturas asfálticas, estabelecendo dois critérios para os métodos de avaliação em laboratório: i) no primeiro, o método deveria ser adaptável tanto ao controle de campo das misturas quanto ao projeto; ii) no segundo, o método deveria produzir essencialmente a mesma densidade, ou razão de vazios, que aquela obtida no pavimento acabado. Nos anos 50, John L. McRae, pertencente ao Corpo de Engenheiros do Exército Americano, desenvolveu um compactador por amassamento giratório, uma vez que as pesquisas daquela época indicavam que a compactação por impacto Marshall não simulava apropriadamente as densidades das misturas nas trilhas das rodas sob tráfego pesado. Ele acreditava que as propriedades mecânicas das amostras produzidas pelo impacto do soquete Marshall não simulavam as propriedades das amostras extraídas dos pavimentos (HARMAN et al., 2002).

Os pesquisadores do SHRP desejavam um dispositivo que compactasse a amostra de mistura betuminosa mais próxima da compactação em campo, de forma que as densidades finais fossem aquelas obtidas no pavimento através de condições reais de clima e carregamento (MOTTA et al., 1996). Com isso, desenvolveu-se o compactador giratório SUPERPAVE.

O compactador giratório SUPERPAVE (CGS) é um dispositivo mecânico composto do seguinte sistema de componentes (MOTTA et al., 1996):

- estrutura de reação, base rotativa e motor;

- medidor de altura e sistema de registro de dados e de carregamento, cabeça de carga, medidor de pressão;
- molde e placa base.

A estrutura de reação apresenta um pórtico indeformável, de modo a permitir compressão pela cabeça de carga por ocasião da compactação do corpo de prova. A base do CGS gira e é afixada na estrutura de reação de carregamento. A base suporta o molde durante a compactação. Mancais são usados para posicionar o molde num ângulo de $1,25^\circ$, que é o ângulo de compactação do CGS. O motor elétrico aciona a base rotativa a uma velocidade constante igual a 30 rpm. Um sistema hidráulico ou mecânico aplica carga na cabeça de carga, que fornece pressão de compactação de 600 kPa ao corpo de prova. O acompanhamento da altura do corpo de prova é uma outra função importante do SGC, conforme relata MOTTA et al. (1996).



Figura 2.8 - Compactador Giratório SUPERPAVE (Vasconcelos, 2004).

O número de giros do CGS requerido é determinado em função do tráfego (número de eixos simples equivalente - ESAL) para 20 anos de projeto e temperatura, sendo determinado um número de giros para a compactação inicial (N_{ini}), de projeto ($N_{projeto}$) e a máxima (N_{max}), conforme pode ser visto no Quadro 2.1 (AASHTO PP28, 2001). Cada amostra é compactada até o número de giros de projeto indicado para o caso, e de acordo com os procedimentos da especificação AASHTO TP4 (2000). No equipamento, é registrada a altura dos corpos-de-prova durante o processo de compactação.

Quadro 2.1 - Esforço de Compactação para o Compactador Giratório SUPERPAVE.

| ESALs de Projeto (10 ⁶) | Temperatura Média Máxima do Ar de projeto | | | | | | | | | | | |
|--|---|----------------------|------------------|----------------------|----------------------|------------------|----------------------|----------------------|------------------|----------------------|----------------------|------------------|
| | < 39°C | | | 39 -40°C | | | 41 -42°C | | | 43 -44°C | | |
| | N _{inicial} | N _{projeto} | N _{max} | N _{inicial} | N _{projeto} | N _{max} | N _{inicial} | N _{projeto} | N _{max} | N _{inicial} | N _{projeto} | N _{max} |
| < 0,3 | 7 | 68 | 104 | 7 | 74 | 114 | 7 | 78 | 121 | 7 | 82 | 127 |
| 0,3 - 1 | 7 | 76 | 117 | 7 | 83 | 129 | 7 | 88 | 138 | 8 | 93 | 146 |
| 1 - 3 | 7 | 86 | 134 | 8 | 95 | 150 | 8 | 100 | 158 | 8 | 105 | 167 |
| 3 - 10 | 8 | 96 | 152 | 8 | 106 | 169 | 8 | 113 | 181 | 9 | 119 | 192 |
| 10 - 30 | 8 | 109 | 174 | 9 | 121 | 195 | 9 | 128 | 208 | 9 | 135 | 220 |
| 30 - 100 | 9 | 126 | 204 | 9 | 139 | 228 | 9 | 146 | 240 | 10 | 153 | 253 |
| > 100 | 9 | 142 | 233 | 10 | 158 | 262 | 10 | 165 | 275 | 10 | 172 | 288 |

Fonte: [Bukowki,1994]

Anderson et al. (1995) mostram resultados de um estudo de caso no qual foram utilizados o Compactador Giratório SUPERPAVE e o compactador Marshall para ensaios de controle de qualidade de campo com misturas betuminosas abertas de uma rodovia interestadual do Lexington, Kentucky. O objetivo do projeto era determinar a habilidade do compactador giratório para detectar mudanças súbitas no teor de asfalto. Os resultados indicaram que o compactador giratório parece ser sensível a variações no teor de asfalto. Para amostras de campo, a diferença média nos vazios de ar de duas amostras compactadas no compactador giratório foi de 0,3%, enquanto que para três amostras Marshall foi de 0,6%. Esta variabilidade reduzida é provavelmente resultante do maior tamanho da amostra do compactador giratório.

Estudo realizado por Harman et al. (1995), teve o objetivo de avaliar a eficiência do compactador giratório para gerência de campo na execução de misturas asfálticas. O soquete Marshall foi comparado com o compactador giratório para uso possível como um suplemento para controle de campo. Os resultados indicaram que o compactador giratório pode ser usado como uma ferramenta efetiva para a verificação de campo de misturas asfálticas projetadas em laboratório. Entretanto, em todos os casos, foi observado que o soquete Marshall compacta amostras de maneira muito diferente que a do compactador giratório. Conseqüentemente, foi concluído que o soquete Marshall não deve ser usado para controle de qualidade de campo de misturas asfálticas projetadas usando o sistema SUPERPAVE.

D'angelo et al. (1995) apresentaram resultados de um estudo no qual cinco misturas diferentes, produzidas por cinco usinas também diferentes, foram comparadas utilizando os procedimentos Marshall e SUPERPAVE nível I. Os pesquisadores concluirão de que o compactador giratório foi mais hábil a rastrear a variabilidade da produção em usina do que o soquete Marshall.

Vasconcelos (2004) observou uma maior vida de fadiga para misturas dosadas pelo método SUPERPAVE com relação às dosadas pelo método Marshall, o que pode ter sido ocasionado pela melhor distribuição dos agregados, obtida durante o processo de compactação pelo compactador giratório.

Estudo realizado por Oliveira Filho (2007), para granulometrias TMN de 12,5 mm, mostrou que a compactação Marshall parece produzir misturas com rigidez inferior e apresentar uma menor vida a fadiga que a produzida com o compactador giratório SUPERPAVE, corroborando, portanto os estudos de Vasconcelos (2004).

Estudo comparativo realizado misturas dosadas, segundo os processos de compactação Marshall e SUPERPAVE, realizado por Zaniewski & Nelson (2003), apresentou resultados compatíveis em relação às deformações permanentes. Os autores relatam que a correta aplicação do método aliada aos seus critérios intrínsecos, torna-se mais importante no momento da escolha de qual metodologia deve ser adotada.

Segundo Motta et al. (1996), a principal diferença do SUPERPAVE para o Marshall está no processo de compactação dos corpos-de-prova, pois os pesquisadores do SHRP desejavam um dispositivo que compactasse a amostra de mistura betuminosa mais próxima da compactação em campo, de forma que as densidades finais fossem aquelas obtidas no pavimento através de condições reais de clima e carregamento.

De acordo com os estudos dos autores acima citados, observa-se que o processo de compactação pode influenciar significativamente nas características das misturas asfálticas, mas torna-se necessário ressaltar que a escolha de materiais inadequados e os defeitos construtivos proporcionam misturas asfálticas mais vulneráveis ao surgimento de patologias prematuras no revestimento.

2.5 AGREGADOS

De acordo com a norma ABNT NBR 9935, que determina a terminologia dos agregados, o termo agregado é definido como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassas e de concreto.

Woods (1960) apud Fernandes (2007) define agregado como sendo uma mistura de pedregulho, areia, pedra britada, escória ou outros materiais minerais usada em combinação com um ligante para formar um concreto, uma argamassa etc. Pode-se mencionar que a terminologia "agregado" é um termo genérico para designar areias, pedregulhos, rochas em seus estados naturais ou britado.

Sabendo que as misturas asfálticas são constituídas na sua maioria de cerca de 90% a 95 % de agregado em peso e das influências desses sobre o comportamento das misturas, para conferir resistência mecânica e flexibilidade à camada de rolamento, torna-se importante o conhecimento das suas propriedades e do processo de fabricação, quando artificial. Por exemplo, no processo de britagem, podem [ser retirados da linha de](#)

produção agregados com formas alongadas ou achatadas, que não são desejados para as misturas asfálticas, dando-se preferência à forma cúbica, que apresenta uma melhor qualidade junto às misturas asfálticas (ROBERTS et al., 1996).

Segundo Masad et al. (2005), a literatura aponta para o efeito de agregados achatados e alongados, que afetam negativamente a durabilidade das misturas, na medida em que estão sujeitos a quebrarem durante os processos de usinagem e compactação. Também chamam a atenção para alguns estudos recentes que, utilizando técnicas de análise de imagens, enfatizaram a significativa influência da textura dos agregados no desempenho de misturas.

De acordo com Orchard (1976) apud Balbo (2007), a forma dos grãos pode ser definida em termos de sua esfericidade e de sua angulosidade. Normalmente, é tido como regra que agregados de forma cúbica fornecem melhores propriedades às misturas asfálticas.

A seleção de agregados para utilização em revestimentos asfálticos depende de sua disponibilidade, custo e qualidade, bem como do tipo de aplicação. Segundo Robert's et al. (1996), são as propriedades físicas dos agregados que determinam principalmente a adequação para o uso em misturas asfálticas e em menor extensão as propriedades químicas, pois essas têm pequenos efeitos sobre o desempenho da mistura, salvo quando afetam a adesividade do ligante asfáltico ao agregado e a compatibilidade com aditivo "dope" que pode ser incorporado ao ligante.

As ligações entre as moléculas de ácidos e de base com as moléculas do agregado são um dos principais fatores na adesão do CAP. Contudo, este não será o único fator importante na "resistência" à presença de água, uma vez que as propriedades físicas do agregado, a porosidade e a textura superficial também irão influenciar. Os agregados que apresentam uma textura mais grossa e uma grande quantidade de poros superficiais irão apresentar uma maior área superficial para ligação e uma menor susceptibilidade à presença de água (BALBO, 2007).

2.5.1 DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS

A distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características, que efetivamente influencia no comportamento dos revestimentos asfálticos. Em misturas asfálticas, a distribuição granulométrica do agregado influencia quase todas as propriedades importantes, incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida.

A granulometria é determinada usualmente por meio de uma análise por peneiramento. Nessa análise, uma amostra seca é fracionada através de uma série de peneiras com aberturas de malha em ordem decrescente.

Da mesma forma que as misturas projetadas para uso rodoviário exigem que os agregados se enquadrem em uma determinada faixa granulométrica, no setor aéreo ocorre a mesma exigência, com diferenciações apenas nos limites dessas faixas.

A United States Army Corps of Engineers (USACE) classifica as misturas asfálticas em três tipos, com base na graduação dos agregados: i) densas; ii) abertas e iii) descontínuas, conforme está mostrado na Figura 2.9.

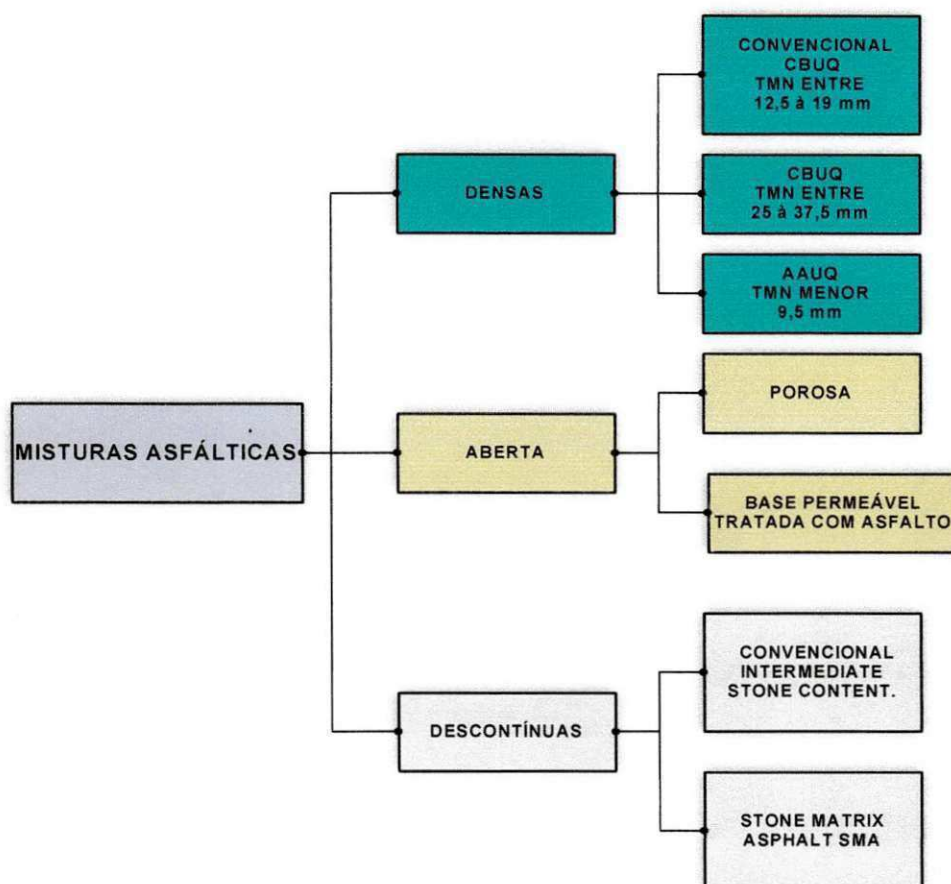


Figura 2.9 Diagramas da classificação das misturas asfálticas de acordo a distribuição granulométrica dos agregados.

- Misturas de Graduação Densa

Também denominadas bem-graduadas, são aquelas que possuem agregados graduados, desde o tamanho máximo até o pó mineral que deve existir em quantidade suficiente para reduzir os vazios do agregado compactado, ou seja, quando os grãos menores preenchem os vazios dos grãos maiores.

- Misturas de Graduação Aberta

São aquelas que não empregam o filer ou o empregam em pequena quantidade, fazendo com que o volume de vazios do agregado graúdo compactado seja maior que o volume de agregados miúdos e filer existente, ou seja, quando a curva granulométrica apresenta continuidade, bem como pouco material miúdo e fino.

- Misturas de Graduação Descontínua

São aquelas que têm alguns diâmetros nominais intermediários de agregados omitidos quando comparadas às misturas densas bem graduadas. Essa omissão dos diâmetros intermediários forma um degrau ou "gap" na curva granulométrica, fazendo com que haja maior contato grão a grão e maior quantidade de vazios entre agregados graúdos.

Os limites das faixas granulométricas para as misturas asfálticas utilizadas para construção de aeródromos são estabelecidos por órgãos nacionais e internacionais através do diâmetro máximo do agregado. Os limites das Faixas estabelecidos pela Aeronáutica e FAA (Federal Aviation Administration) são mostrados nos Quadros 2.2 e 2.3, respectivamente.

Quadro 2.2 Faixa de distribuição dos grãos para revestimento asfáltico segundo a Aeronáutica.

| PENEIRAS | | PORCENTAGEM, EM MASSA, PASSANDO | | | | |
|----------|--------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| mm | nº | Faixa 1 | Faixa 2 | Faixa 3 | Faixa 4 | Faixa 5 |
| 38,1 | 1 1/2 | 100 | - | - | - | - |
| 25,4 | 1 | 79-89 | 100 | - | - | - |
| 19,1 | 3/4 | - | 80-98 | 100 | - | - |
| 12,7 | 1/2 | 61-84 | 68-93 | 80-98 | 100 | - |
| 9,5 | 3/8 | - | - | - | 79-96 | 100 |
| 4,8 | nº 4 | 42-66 | 45-75 | 55-80 | 59-85 | 75-95 |
| 2,0 | nº 10 | 31-55 | 32-62 | 40-66 | 43-70 | 56-84 |
| 0,42 | nº 40 | 16-34 | 16-37 | 22-40 | 23-42 | 26-50 |
| 0,18 | nº 80 | 10-22 | 10-24 | 10-26 | 13-26 | 14-32 |
| 0,074 | nº 200 | 3-7 | 3-8 | 3-8 | 4-8 | 5-11 |

Fonte: [Norma NSMA 85-2].

Quadro 2.3 Faixa de distribuição dos grãos para revestimento Asfáltico segundo a FAA.

| PENEIRAS | | PORCENTAGEM, EM MASSA, PASSANTE | | | |
|--------------|--------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| mm | nº | 1-1/2" max | 1"máx | 3/4"máx | 1/2"máx |
| 37,5 | 1 1/2 | 100 | - | | |
| 24,0 | 1 | 86 - 98 | 100 | - | - |
| 19,1 | 3/4 | 68 - 93 | 76 - 98 | 100 | - |
| 12,5 | 1/2 | 57 - 81 | 66 - 86 | 79 - 99 | 100 |
| 9,5 | 3/8 | 49 - 69 | 57 - 77 | 68 - 88 | 79-99 |
| 4,75 | nº 4 | 34 - 54 | 40 - 60 | 48 - 68 | 58 - 78 |
| 2,36 | nº 8 | 22 - 42 | 26 - 46 | 33 - 53 | 39 - 59 |
| 1,18 | nº 16 | 13 - 33 | 17 - 37 | 20 - 40 | 26 - 46 |
| 0,600 | nº 30 | 8 - 24 | 11 - 27 | 14 - 30 | 19 - 35 |
| 0,300 | nº 50 | 6 - 18 | 7 - 19 | 0 - 21 | 12 - 24 |
| 0,150 | nº 100 | 4 - 12 | 6 - 16 | 6 - 16 | 7 - 17 |
| 0,075 | nº 200 | 3 - 6 | 3 - 6 | 3 - 6 | 3 - 6 |
| % de Ligante | | 4,5 - 7,0 | 4,5 - 7,0 | 5,0 - 7,5 | 5,5 - 8,0 |

Fonte: [Norma NSMA 85-2]

2.6 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO – CAP

O Cimento Asfáltico de Petróleo são substâncias compostas por hidrocarbonetos pesados, com propriedades aglomerantes, inflamáveis, de elevada viscosidade a temperatura ambiente, e que ocorrem na natureza ou são obtidos por fabricação, a partir da destilação do Petróleo.

Segundo BERNUCCI et al. (2007), o CAP é uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, podendo conter ainda outros materiais, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, em pequena proporção e apresenta comportamento de material viscoelástico sendo na sua totalmente solúvel em benzeno, tricloroetileno ou em bissulfeto.

A principal matéria prima para a obtenção do Asfalto é o petróleo, que tem sua origem de natureza orgânica, pela ação de bactérias anaeróbicas, em combinação com pressão e temperatura, transformando-os em hidrocarbonetos (LOMBARDI, 1983).

2.6.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Os CAPs são constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais - vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes. Os cimentos

asfálticos de petróleos brasileiros têm baixo teor de enxofre e de metais, e alto teor de nitrogênio, enquanto os procedentes de petróleos árabes e venezuelanos têm alto teor de enxofre (LEITE, 1999).

A composição química é bastante complexa, apresentando influência no desempenho físico e mecânico das misturas asfálticas, mas sua maior influência está presente nos processos de incorporação de agentes modificadores, tais como os polímeros.

Segundo o DNIT (1998), quimicamente o asfalto é definido como um sistema coloidal constituído por micelas de asfaltenos dispersadas em um meio intermicelar oleoso, formado pela mistura de óleos aromáticos e saturados, chamados maltenos.

Os métodos de separação do asfalto em frações têm um ponto comum que é a separação da parte sólida do asfalto (os asfaltenos) pela adição de um solvente que dissolva os maltenos e não dissolva os asfaltenos. Utiliza-se de uma propriedade fundamental dos sistemas coloidais, que é a destruição de sua estabilidade pela eliminação da camada de proteção das micelas, que faz com que elas se associem e precipitem pela ação da gravidade.

É importante relatar que as proporções de asfaltenos e maltenos nos CAPs variam de acordo com sua exposição ao oxigênio, temperaturas ambientes e ao contato com óleos, graxas e combustíveis (BALBO, 2007). Os Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) são preparados para apresentar características próprias para uso direto na construção de camadas asfálticas de pavimentos. É um material adequado para aplicação em serviços de pavimentação, pois além de suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, possuem características de flexibilidade, durabilidade e alta resistência à ação da maioria dos produtos inorgânicos.

2.6.2 Classificação dos CAPs

Os CAPs podem ser classificados de acordo com diversas propriedades. No entanto, aquelas tradicionalmente adotadas para fins de classificação em engenharia rodoviária são baseadas no seu grau de "grau de dureza", onde quando menor a penetração, "mais duro" é o CAP, retratado no ensaio de penetração ou através da sua viscosidade. Atualmente está em vigor no Brasil a classificação dos CAPs através do ensaio de penetração, conforme mostrado na Tabela 2.7.

O ensaio de penetração, embora empírico, tem a vantagem de caracterizar os CAPs em temperaturas ambientes de 25°C, sendo um teste rápido, de fácil interpretação e de baixo custo. Todavia, com apenas a medida da penetração não se tem afeirir qualquer determinação de suas propriedades reológicas.

Tabela 2.7 - Classificação dos Cimentos Asfálticos quanto penetração (DNIT 095/2006 - EM).

| Classificação por Penetração |
|------------------------------|
| CAP 30/45 |
| CAP 50/70 |
| CAP 85/100 |
| CAP 150/200 |

Entre 1987 e 1993, o Strateg Highway Research Program (SHRP) investiu algumas dezenas de milhões de dólares na determinação da especificação SUPERPAVE, que resultou em critérios mais pautados por testes reológicos de engenharia para classificação dos CAPs, sendo tal classificação simbolizada pela sigla PG (Performance Grade - "Classificação por Desempenho"), pelo qual se procura adotar um CAP, dependendo da região do país, com base nas expectativas de temperatura de serviço dos revestimentos asfálticos.

A especificação SUPERPAVE consiste em analisar as características dos ligantes asfálticos nas temperaturas de serviço possíveis, ao contrário das especificações tradicionais, que requerem ensaios em temperatura préfixadas. A nomenclatura adotada faz referência a dois aspectos climáticos: a) a média da temperatura média máxima dos sete dias consecutivos mais quentes; e b) a temperatura mínima esperada para o material em serviço em dada localidade nos EUA. Isto é, um CAP classificado como PG 64 -22 refere-se a um asfalto a ser empregado em condições de serviço de 64°C de máxima média e de -22°C de temperatura mínima. Na Tabela 2.8 mostra-se a especificação SUPERPAVE para classificação dos CAPs.

Tabela 2.8 - Classificação dos CAPs pela especificação SUPERPAVE nos EUA.

| Temperaturas Elevadas (°C) | Temperaturas Baixas Associadas (°C) |
|----------------------------|-------------------------------------|
| PG 46 | -34, -40, -46 |
| PG 52 | -10, -16, -22, -28, -34, -40, -46 |
| PG 58 | -16, -22, -28, -34, -40 |
| PG 64 | -10, -16, -22, -28, -34, -40 |
| PG 70 | -10, -16, -22, -28, -34, -40 |
| PG 76 | -10, -16, -22, -28, -34 |
| PG 82 | -10, -16, -22, -28, -34 |

Fonte [BALBO,2007]

Nota: PG - "Performance Grade" ou "Classificação por Desempenho".

2.7 PARÂMETROS MECÂNICOS

2.7.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Resiliência, por definição, é a energia que um material consegue absorver no regime elástico, devolvendo-a totalmente no descarregamento (uma deformação elástica), ou seja, é a capacidade que um material tem de não acumular deformações residuais (deformações plásticas) depois de cessada a ação do carregamento, sendo definido pela relação entre tensão de tração aplicada e a respectiva deformação sofrida.

$$MR = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots [2.9]$$

MR = Módulo de Resiliência do material ;

σ = Tensão de tração (na compressão diametral);

ε = Deformação.

O módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas é empregado no dimensionamento de novas camadas, bem como na condição de parâmetro definidor do projeto de reforço estrutural dos pavimentos existentes.

O ensaio empregado para determinação do MR de misturas asfálticas é executado aplicando-se um carregamento cíclico no plano diametral de um corpo-de-prova cilíndrico, regular, com diâmetro e espessura de aproximadamente 100 mm e 63,5 mm, respectivamente. O carregamento gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga, provocando então o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal, correspondente à tensão gerada, numa determinada temperatura (T), geralmente 25°C.

As misturas asfálticas por herdarem a viscoelasticidade apresentada pelo CAP, possuem níveis de deformações dependentes do tempo de ação de carga e da temperatura. Assim quanto mais rápida a aplicação das cargas, menor a deformação medida e maior o módulo resiliente aferido para o material (BALBO, 2007).

Segundo PINTO (1991), os principais fatores que afetam o módulo de resiliência das misturas betuminosas são:

a) Fatores de carga:

- magnitude de carregamento;
- frequência, duração e intervalo de tempo entre aplicações sucessivas do carregamento;
- tipo do carregamento (tensão ou deformação controlada);
- história de tensões;
- forma do carregamento (triangular, senoidal, etc.).

b) Fatores de mistura:

- tipo de agregado, forma, textura e granulometria;
- penetração do asfalto;
- teor de asfalto;
- índice de vazios;
- relação filer-betume.

c) Fatores ambientais:

- temperatura.

Segundo Marques (2006), os módulos de resiliência de misturas asfálticas podem variar segundo:

- tipo de ligante asfáltico;
- tipo de mistura (CBUQ, SMA, CPA, AAUQ);
- granulométrica da mistura;
- energia e processo de compactação;
- temperatura de compactação.

Pinto & Preussler (1980) realizaram uma interessante pesquisa, na qual foram executados diversos ensaios de tração por compressão diametral e de módulo de resiliência de misturas asfálticas preparadas com dois tipos de cimentos asfálticos (CAP 60/70 e CAP 85/100), dosadas pelo método Marshall, em três faixas granulométricas (A, B e C) do DNER atual DNIT. Nessa pesquisa, todos os ensaios foram executados a uma temperatura de 25°C, tempo de carregamento de 0,10 s e frequência de 1 Hz. Os autores obtiveram as seguintes conclusões:

- não houve influência marcante da faixa granulométrica sobre os valores de módulo de resiliência e resistência à tração;
- genericamente, o CAP 50/70 conferiu às misturas valores de módulo de resiliência e resistência à tração superior àqueles encontrados com o CAP 85/100, ficando patente à influência da viscosidade do cimento asfáltico sobre a rigidez da mistura betuminosa;
- foi observado que o teor ótimo de cimento asfáltico, determinado pelo método Marshall, corresponde, na maioria dos casos, aos maiores valores de módulos de resiliência e de resistência à tração.

Bourdreau et al. (1992) apud Neto (2004) realizaram um estudo sobre o efeito das condições de ensaio sobre a repetibilidade dos valores de módulo de resiliência obtidos para misturas asfálticas. Foram estudadas duas misturas compostas com agregados diferentes, compactadas segundo o método Marshall, com dois níveis de volumes de vazios (4 e 10%) e ensaiadas sob três temperaturas diferentes: 5, 25 e 40°C. De acordo com esses autores, o módulo de resiliência de misturas asfálticas é dependente de muitos fatores, incluindo o equipamento de ensaio, do operador, do método de compactação dos corpos-de-prova, da energia de compactação e também

dos parâmetros ou condições de ensaio, tais como temperatura, frequência e tempo de aplicação da carga e o nível de deformação aplicada ao corpo-de-prova.

Segundo experiências dos pesquisadores citados, o módulo de resiliência de misturas betuminosas apresenta muitas variáveis que influenciam o seu valor final. Assim, com o propósito de isolar a influência de algumas dessas variáveis, devem-se fixar as variáveis CAP, temperatura, para minorar o efeito sobre as mesmas. Nas Tabelas 2.9 e 2.10 são mostrados valores de MR encontrados pelos autores, para diferentes misturas asfálticas.

Tabela 2.9 Valores de MR e RT de misturas asfálticas.

| Faixa (DNER) | Emprego | Ligante (%) | Mr (MPa) | RT (MPa) |
|--------------|---------|-------------|---------------|----------|
| A | Binder | 4,5 – 5,5 | 3.000 – 3700 | - |
| B | Binder | 4,3 – 5,4 | 3.200 – 4.900 | 0,81 |
| B | Binder | 4,8 – 5,8 | 2.700 – 3.800 | 0,80 |
| B | Capa | 4,8 – 5,8 | 2.700 – 3.800 | 0,73 |
| C | Capa | 5,5 – 6,5 | 3.800 – 3.900 | 0,87 |
| C | Capa | 5,5 – 6,5 | 3.800 – 4.300 | 0,96 |

Fonte: Preussler, 1983.

Tabela 2.10 Módulo de Resiliência, RT e MR/RT para CAUQ convencionais.

| Tipo de CAP | Procedência | Processo de Fabricação | Mr (MPa) | RT (MPa) | Mr / RT |
|-------------|-------------|-------------------------|----------|-------------|---------|
| 50 / 60 | Bachaquero | Vácuo | 4.000 | 0,65 | 6.154 |
| 50 / 60 | Mistura | Vácuo | 4.100 | 0,64 | 6.406 |
| 30 / 45 | Árabe leve | Desasfaltação a propano | 6.071 | 1,06 | 5.727 |
| 20 / 45 | Árabe leve | Desasfaltação a propano | 14.614 | 1,91 | 7.651 |
| 55 | Mistura | Vácuo / Des. a propano | 5.247 | 1,08 | 4.5858 |
| 20 | Mistura | Vácuo | 3.500 | 1,08 | 4.5858 |

Fonte: Pinto (1991).

3.0 CAPÍTULO

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram: CAP 50/70, a cal hidratada tipo CH-I e areia de campo, disponibilizados pela, Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior, ATECEL. Foram utilizadas a Brita 25, Brita 19, Pedrisco 3/8" e Pó-de-Pedra, disponibilizadas pela Pedreira BRITEX, localizada na BR-230, na cidade de Campina Grande, mostrada na Figura 3.1.

Os agregados utilizados foram coletados segundo as recomendações da norma PRO 120/97 do DNIT.

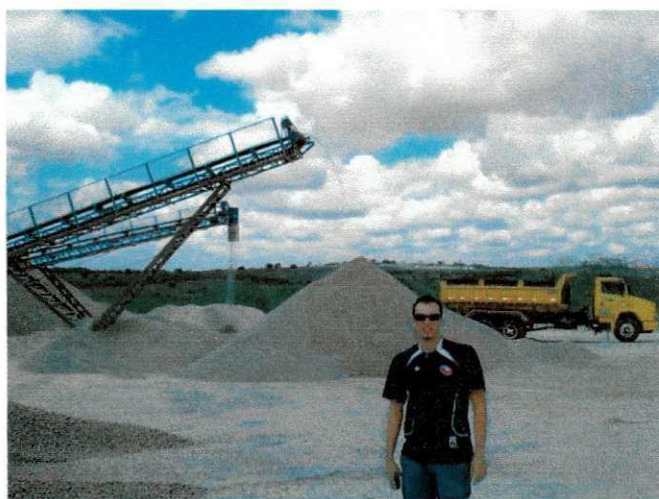


Figura 3.1 – Foto do pátio da pedreira BRITEX.

3.1.1 AGREGADOS GRAÚDOS

Os agregados graúdos utilizados foram pedrisco 3/8", Brita 19 e Brita 25 de origem granítica, onde se optou por estes materiais pela presença de pedreira próxima da cidade de Campina Grande. Fotos dos agregados usados nas dosagens empregadas nesta pesquisa são mostradas na Figuras 3.2.

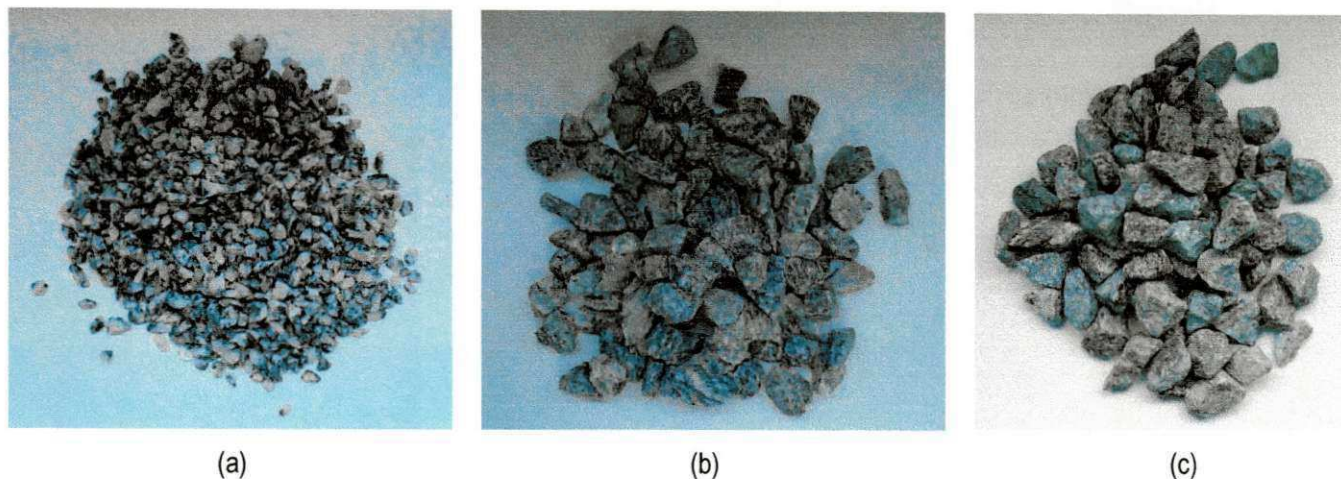


Figura 3.2 – (a) Pedrisco 3/8", (b) Brita 19 mm, (c) Brita 25 mm (Agregados graúdos).

3.1.2 AGREGADOS MIÚDOS

Os agregados miúdos utilizados foram agregado miúdo natural, areia de campo do tipo quartzosa, da jazida do rio Paraíba, e agregado miúdo artificial Pó-de-Pedra, da pedreira Britex. Fotos desses materiais são mostradas na Figura 3.3.

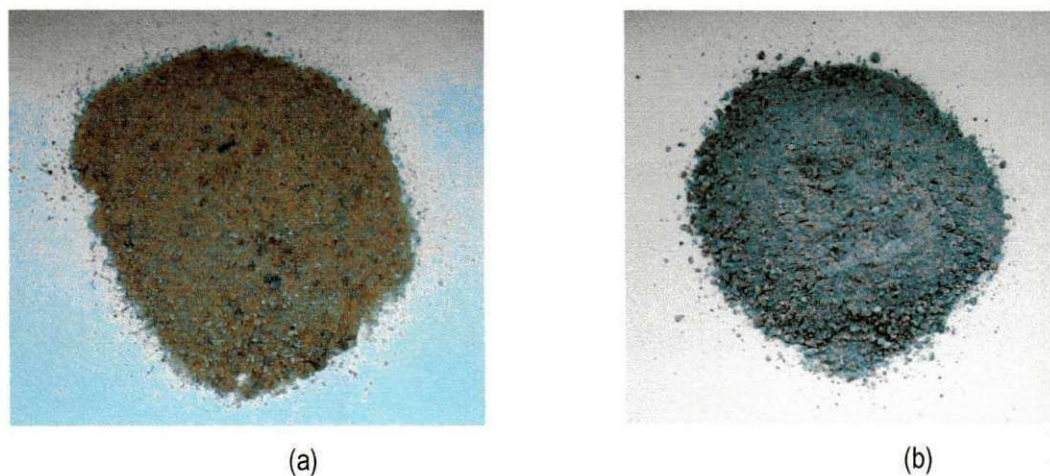


Figura 3.3 – Detalhes da textura dos agregados miúdos: (a) Areia-de-Campo; (b) Pó-de-Pedra.

Os agregados graúdos utilizados são de origem granítica, onde os ensaios de granulometria foram realizados de acordo a norma DNIT – ME 081/94, sendo apresentadas na Tabela 3.1 as composições granulométricas empregadas, onde se observa a distribuição do tamanho dos grãos apenas nas peneiras auxiliares da Faixa 2 da Aeronáutica.

Foi utilizado agregado graúdo com diâmetro máximo de 25 mm e foi verificado se os agregados graúdos apresentavam adesividade satisfatória com o ligante.

Os agregados miúdos utilizados nesta pesquisa foram de natureza artificial (pó-de-pedra) e natural (areia de campo), pois ocorreu a necessidade desses dois agregados para o enquadramento das misturas na faixa em estudo. Os dados de granulometria destes materiais estão também apresentados na Tabela 3.1, onde constam os valores médios de cada granulometria realizada, mostrando a distribuição dos tamanhos dos grãos apenas nas peneiras auxiliares da Faixa 2 da Aeronáutica.

Tabela 3.1 Granulometria em percentual do massa passante dos agregados.

| Peneira | | Agregados | | | | |
|---------|-------|-----------|----------|---------------|-------|-------------|
| | | Brita 25 | Brita 19 | Pedrisco 3/8" | Areia | Pó-de-Pedra |
| 1,5 | 38,10 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 1" | 25,00 | 98,2 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3/4" | 19,00 | 37,5 | 97,3 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 1/2" | 12,50 | 1,2 | 19,3 | 100,0 | 99,6 | 100,0 |
| nº 4 | 4,80 | 0,1 | - | 33,3 | 95,3 | 99,8 |
| nº 10 | 2,00 | - | - | 3,0 | 85,5 | 77,2 |
| nº 40 | 0,42 | - | - | 1,9 | 24,6 | 40,7 |
| nº 80 | 0,18 | - | - | 1,2 | 1,3 | 16,3 |
| nº 200 | 0,074 | - | - | 0,7 | 0,2 | 6,0 |

Foram ainda realizados ensaios para determinação das massas específicas real e aparente e absorção dos agregados, conforme as normas especificadas na Tabela 3.2, bem como os ensaios de seleção dos agregados estabelecidos pelos métodos da dosagem Marshall.

Os ensaios para seleção dos agregados foram realizados de acordo com as normas que especifica cada ensaio. O ensaio de equivalente de areia foi realizado no Laboratório de pavimentação da ATECEL, e os valores dos ensaios de abrasão Los Angeles (dureza).

Tabela 3.2 Caracterização dos materiais.

| Características | Norma | Und | MATERIAIS | | | | |
|---------------------------|---------------|-------------------|-----------|----------|------------------|-----------------|-------------------|
| | | | Brita 25 | Brita 19 | Pedrisco 3/8" | Pó-de- Pedra | Areia de campo |
| Massa Especifica real | ** | g/cm ³ | 2,665 | 2,657 | 2,690 | 2,653 | 2,614 |
| Massa Especifica Aparente | ** | g/cm ³ | | | | | |
| Absorção | ** | % | 0,29 | 0,3 | 0,3 | - | - |
| Equivalente de Areia | ME-54/97 | % | - | - | - | 81,4 | 98 |
| Abrasão Los Angeles | ME-035/9 | % | 30 | 30 | - | - | - |
| Adesividade do agregado | ME- 078/94 | | Satisf*. | Satisf*. | Satisf*. | | |

3.1.3 CAL HIDRATADA (FILER)

O material de preenchimento, Filer, utilizado nesta pesquisa foi a cal hidratada CH-I, por apresentar na distribuição dos grãos partículas com diâmetros menores que 40 µm, o que proporciona um melhor desempenho das propriedades mecânicas das misturas asfálticas, tais como aumento da adesividade e um melhor desempenho na sensibilidade à água e à suscetibilidade térmica. Figura 3.4 mostra uma foto da cal hidratada utilizada.



Figura 3.4 – A cal hidratada.

3.1.4 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)

O CAP utilizado na pesquisa foi do tipo 50/70, cujas especificações estão de acordo com o Departamento Nacional de Petróleo (DNP) e a Agência Nacional de Petróleo (ANP), mostrado na Figura 3.5.

- ensaios de dosagem das misturas, cujo objetivo foi determinar o teor de projeto para as misturas estudadas de acordo com a metodologia Marshall;
- ensaios para determinação das características mecânicas das misturas, para quantificar as propriedades de engenharia de misturas asfálticas. Entre estes se destacam os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência.

É importante ressaltar que foi utilizado a técnica da amostragem aleatória e a utilização de réplicas para realização dos ensaios, de modo a diminuir os efeitos dos fatores não-controlados das variáveis respostas. Os ensaios foram desenvolvidos em três locais: Laboratórios da ATECEL/UFCG; de Geotecnia e Pavimentação da UFS, GEOPAV/UFS; e de Materiais, da UFCG, sendo que no Laboratório de Pavimentação da ATECEL foram realizados os ensaios de caracterização das amostras e o ensaio Marshall, enquanto os ensaios carga repetida foram feitos no laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFS.

3.2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

3.2.1.1 Agregados

Para a realização da caracterização física dos agregados, estes foram coletadas em campo, segundo a norma PRO 120/97, do DNIT, e efetuada a redução das amostras pelo procedimento de quarteamento, mostrado na Figura 3.6.

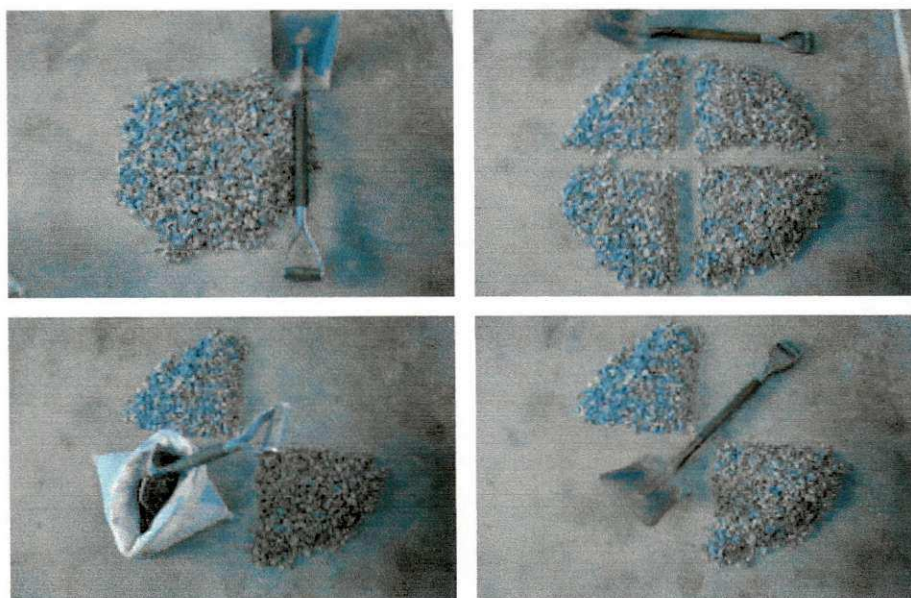


Figura 3.6 – Seqüência de fotos do processo de quarteamento das amostras de agregados.

Os ensaios para determinação das distribuições dos tamanhos das partículas, realizados a partir do ensaio de análise granulométrica por peneiramento, e a determinação das massas específicas real e aparente dos agregados foram realizados de acordo com as normas descritas na Tabela 3.5.

Para o material de preenchimento, a cal hidratada CH-I, foi utilizado para a realização da distribuição dos tamanhos das partículas, o equipamento de difração a laser, "granulômetro", marca Cilas 1064 LD, com faixa analítica de 0,04 a 500 micron e emissores de laser secundários. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia dos Materiais da UFCG. A Figura 3.7 mostra uma foto do equipamento de difração a laser empregado.

Tabela 3.5 - Normas utilizadas para caracterização dos agregados e filer.

| ENSAIOS | METODOLOGIA |
|---|------------------|
| Análise granulométrica dos agregados por peneiramento | DNIT - ME 083/98 |
| Massa específica real dos agregados Graúdos | DNIT - ME 081/98 |
| Massa específica real dos agregados Miúdos | DNIT - ME 084/95 |
| Massa específica real filer | DNIT - ME 093/94 |
| Equivalente de areia | DNIT - ME 054/97 |
| Abrasão Los Angeles | DNIT - ME 035/98 |
| Partículas Chatas ou Alongadas | ASTM D 4791 - 99 |

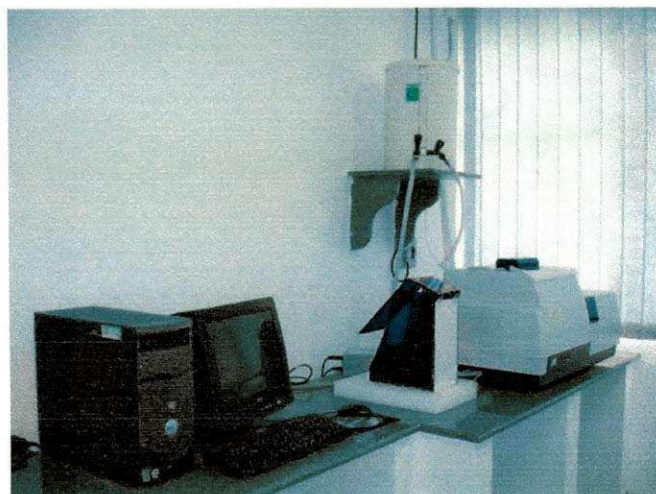


Figura 3.7 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de difração a laser.

3.2.1.2 Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP

A caracterização do CAP foi realizada de acordo com as normas técnicas reportadas na Tabela 3.6, e com dados obtidos nos seguintes ensaios: ensaio de penetração, determinação do ponto de fulgor, determinação da massa específica e ensaio de viscosidade saybolt-furol.

Tabela 3.6 - Normas utilizadas para a realização dos ensaios de caracterização do CAP.

| ENSAIOS | METODOLOGIA |
|---------------------------|--------------------------|
| Viscosidade Saybolt Furol | ABNT – NBR 14.756 / 2001 |
| Penetração | DNIT-ME 003/99 |
| Ponto de fulgor | DNIT-ME 148/94 |
| Massa específica | DNIT ME 117/94 |

3.2.2 ENSAIO DE VISCOSIDADE SAYBOLT-FUROL

O ensaio de Viscosidade Saybolt-furol trata-se de uma medida indireta de viscosidade do CAP com auxílio do viscosímetro Saybolt-Furol.

O equipamento é composto, basicamente, de um tubo com formato e dimensões padronizadas, no fundo do qual fica um orifício de diâmetro $3,15 \pm 0,02$ mm e um recipiente de volume padrão de 60 ml, tendo como equipamento auxiliar a utilização de um cronômetro. A Figura 3.8 mostra o aparelho Saybolt-Furol.



Figura 3.8 – Equipamento Saybolt-Furol.

Tabela 3.4 Características do ligante asfálticos CAP 50/70, Fazenda Alegre, segundo especificação SUPERPAVE.

| Características | CAP 50/70 |
|--|------------------|
| Viscosidade Bookfield 135°C, 20 rpm | 474 |
| Viscosidade Bookfield 150°C, 20 rpm | 238 |
| Viscosidade Bookfield 175 °C, 20 rpm | 89 |
| Ductibilidade a 25°C, cm | > 150 |
| Cisalhamento $G^*/\text{sen}\delta$, °C | 64 |
| Penetração a 35 °C, 100g, 5s, dmm | 143 |
| Penetração a 25 °C, 100g, 5s, dmm | 51 |
| Penetração a 15 °C, 100g, 5s, dmm | 16 |
| Ponto de Amolecimento, °C | 51,1 |
| Viscosidade absoluta a 60°C, P | 3972 |
| PVN | -0,4 |
| Envelhecimento RTFOT | |
| Após RTFOT | |
| Perda de massa, % RTFOT | 0,08(p) |
| Viscosidade absoluta a 60 °C,P | 10510 |
| Ductibilidade a 25°C, cm | > 150 |
| Relação viscosidade Após/ Antes RTFOT | 2,7 |
| Cisalhamento $G^*/\text{sen}\delta$, °C | 64 |
| Penetração a 25 °C, 100g, 5s, dmm | 36 |
| Ponto de Amolecimento, °C | 57 |
| Envelhecimento RTFOT / PAV | |
| Cisalhamento $G^*/\text{sen}\delta$, °C | 19 |
| Fluência, Rigidez e Relaxamento, °C | -18 |
| Grau de Desempenho-PG | 64 -22 |

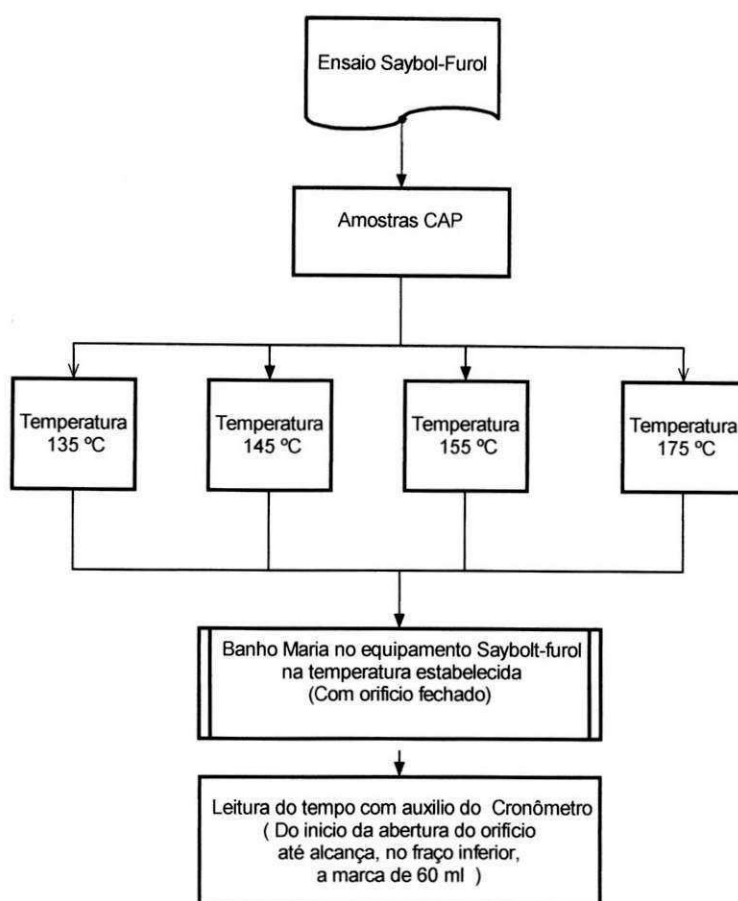
3.2 MÉTODOS

Para desenvolver a pesquisa foi necessário um planejamento experimental baseado na revisão bibliográfica, onde a escolha dos métodos de ensaios foi realizado visando alcançar os resultados delineados no objetivo do trabalho.

Os ensaios tiveram as seguintes etapas:

- ensaios de caracterização, nos quais agregados e ligantes utilizados foram devidamente identificados;

O ensaio foi realizado com as seguintes etapas mostrado no fluxograma 3.1.



Fluxograma 3.1 Ensaio de Viscosidade Saybolt-Furol

Para se fazer a curva viscosidade-temperatura, foi utilizado o par coordenado (Temperatura ,Tempo médio em segundos), chamado de Viscosidade Saybolt-furol, sendo necessária a determinação do par para cada temperatura, o que torna o processo demorado. Nesta pesquisa foram utilizadas as temperaturas de 135 °C, 145°C, 155°C, 175°C. Logo, através do gráfico Saybolt-furol é possível determinar as faixas de temperaturas mais adequadas para o aquecimento do ligante, agregados e compactação da mistura.

3.2.3 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

3.2.3.1 Misturas Asfálticas

O projeto de uma mistura em concreto asfáltico para pavimentação se constitui de um estudo de seleção e dosagem de materiais, com a finalidade de enquadrá-los da maneira mais econômica e técnica possível, de modo que atendam às especificações dos órgãos, empresas ou instituições de pesquisa (Aeronáutica, DNIT e FAA).

Nesta pesquisa foram utilizadas três misturas diferentes, tendo como referência a Faixa 2 de granulometria preconizada pelo aeronáutica, e, como faixa auxiliar, a Faixa 2 da P-401 (FAA). Essas misturas foram determinadas com a preocupação, além dos objetivos iniciais, de estudar também os limites dessa faixa e propor possíveis modificações, caso sejam necessárias nos intervalos da Faixa 2 da aeronáutica.

A Mistura 01 apresenta uma granulometria densa, na qual foram utilizadas as seguintes proporções de agregados em peso: 15% de brita 25, 18% de brita 19, 22% de pedrisco 3/8" e 40% de pó-de-pedra. Como material de preenchimento, foi utilizado 5% da cal hidratada tipo CH-I. O Quadro 3.1 e a Figura 3.9 mostram as distribuições granulométricas dos agregados e a granulometria da mistura 01, bem como o gráfico da curva com os limites da Faixa 2 da Aeronáutica, P-402, e os pontos de controle da metodologia SUPERPAVE .

Quadro 3.1 Distribuição granulométrica da Mistura 01.

| Peneira | | Materiais convencionais | | | | | | | | | | Projeto | Faixa 2 INFRAERO | |
|---------|-------|-------------------------|-------|----------|-------|--------------|-------|-------------|-------|--------|------|---------|------------------|--------|
| | | Brita 25 | | Brita 19 | | Pedrisco 3/8 | | Pó-de-Pedra | | Cal | | | Mínimo | Máximo |
| Pol | (mm) | Total | 15 % | Total | 18 % | Total | 22 % | Total | 40 % | Total | 5 % | 100 % | | |
| 1" | 25,00 | 98,2 | 14,73 | 100,0 | 18,00 | 100,0 | 22,00 | 100,00 | 40,00 | 100,00 | 5,00 | 99,73 | 100,00 | 100,00 |
| 3/4" | 19,00 | 37,5 | 5,63 | 97,3 | 17,51 | 100,0 | 22,00 | 100,00 | 40,00 | 100,00 | 5,00 | 90,14 | 80,00 | 98,00 |
| 1/2" | 12,50 | 1,2 | 0,18 | 19,3 | 3,47 | 100,0 | 22,00 | 100,00 | 40,00 | 100,00 | 5,00 | 70,65 | 68,00 | 93,00 |
| nº 4 | 4,80 | 0,1 | 0,02 | 0,0 | 0,00 | 33,3 | 7,33 | 99,80 | 39,92 | 100,00 | 5,00 | 52,26 | 45,00 | 75,00 |
| nº 10 | 2,00 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 3,0 | 0,66 | 77,20 | 30,88 | 100,00 | 5,00 | 36,54 | 32,00 | 62,00 |
| nº 40 | 0,42 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 1,9 | 0,42 | 40,70 | 16,28 | 100,00 | 5,00 | 21,70 | 16,00 | 37,00 |
| nº 80 | 0,18 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 1,2 | 0,26 | 16,30 | 6,52 | 100,00 | 5,00 | 11,78 | 10,00 | 24,00 |
| nº 200 | 0,074 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 0,7 | 0,15 | 6,00 | 2,40 | 100,00 | 5,00 | 7,55 | 3,00 | 8,00 |

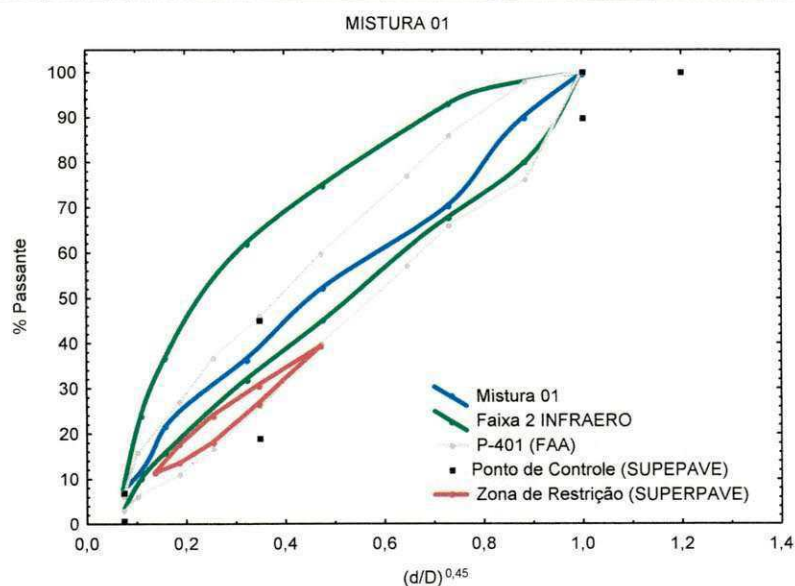


Figura 3.9 Curvas Fuller da Mistura 01.

A Mistura 02 apresenta uma granulometria próxima do limite superior da faixa de referência, sendo uma mistura caracterizada pela utilização de uma maior porcentagem de materiais com tamanho de partículas menores, podendo ser chamada de uma mistura de "granulometria fina". Nessa mistura foram utilizadas as seguintes proporções de agregados em peso: 10% de brita 19, 20% de pedrisco 3/8", 35% de pó-de-pedra, 30% de areia de campo e 5% da cal hidratada tipo CH-I. O Quadro 3.2 e a Figura 3.10 mostram as distribuições granulométricas dos agregados, bem como o gráfico da curva granulométrica da mistura 02 com os limites da faixa 2 da Aeronáutica, P-402, e os pontos de controle da metodologia SUPERPAVE.

Quadro 3.2 Distribuição granulométrica da Mistura 02.

| Peneira | | Materiais convencionais | | | | | | | | | | Projeto | Faixa 2 | |
|---------|------|-------------------------|------|--------------|------|-------|------|-------------|------|-------|-----|---------|---------|--------|
| | | Brita19 | | Pedrisco 3/8 | | Areia | | Pó-de-Pedra | | Cal | | | Mínimo | Máximo |
| Pol | (mm) | Total | 10% | Total | 20% | Total | 30% | Total | 35% | Total | 5% | 100% | | |
| 1" | 25,0 | 100,0 | 10,0 | 100,0 | 20,0 | 100,0 | 30,0 | 100,0 | 35,0 | 100,0 | 5,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3/4" | 19,0 | 97,3 | 9,7 | 100,0 | 20,0 | 100,0 | 30,0 | 100,0 | 35,0 | 100,0 | 5,0 | 99,7 | 80,0 | 98,0 |
| 1/2" | 12,5 | 19,3 | 1,9 | 100,0 | 20,0 | 99,6 | 29,9 | 100,0 | 35,0 | 100,0 | 5,0 | 91,8 | 68,0 | 93,0 |
| nº 4 | 4,8 | 0,0 | 0,0 | 33,3 | 6,7 | 95,3 | 28,6 | 99,8 | 34,9 | 100,0 | 5,0 | 75,2 | 45,0 | 75,0 |
| nº 10 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 3,0 | 0,6 | 85,5 | 25,7 | 77,2 | 27,0 | 100,0 | 5,0 | 58,3 | 32,0 | 62,0 |
| nº 40 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 1,9 | 0,4 | 24,6 | 7,4 | 40,7 | 14,2 | 100,0 | 5,0 | 27,0 | 16,0 | 37,0 |
| nº 80 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 1,2 | 0,2 | 1,3 | 0,4 | 16,3 | 5,7 | 100,0 | 5,0 | 11,3 | 10,0 | 24,0 |
| nº 200 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,7 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 6,0 | 2,1 | 100,0 | 5,0 | 7,3 | 3,0 | 8,0 |

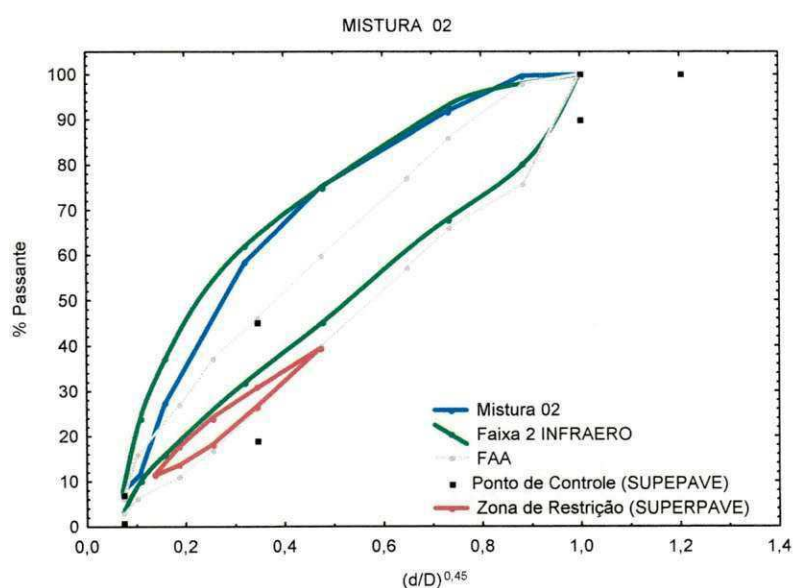


Figura 3.10 Curvas Fuller da Mistura 02.

A curva granulométrica da mistura 03 se encontra abaixo do limite inferior da faixa 2 da aeronáutica, bem próxima do limite inferior da faixa 2 preconizada pela Agência Federal Americana de Aeronáutica FAA, apresentado uma "granulometria grossa", com uma maior proporção de partículas de tamanho maiores, sendo a proporção utilizada de agregados em peso: 38% de brita 25, 37% de pedrisco 3/8", 20% de pó-de-pedra e 5% de filler, a mesma cal hidratada das duas misturas anteriores. As curvas granulométricas das misturas estudadas, bem como os limites da faixa 2 da aeronáutica e P-401 (FAA). O Quadro 3.3 e a Figura 3.11 mostram as distribuições granulométricas dos agregados, bem como o gráfico da curva granulométrica da mistura 03, com os limites da faixa 2 da Aeronáutica, P-402, e os pontos de controle da metodologia SUPERPAVE.

Quadro 3.3 Distribuição granulométrica da Mistura 03.

| Peneira | | Materiais convencionais | | | | | | Filer | | Projeto | Faixa 2 INFRAERO | |
|---------|------|-------------------------|------|--------------|------|-------------|------|-------|-----|---------|------------------|--------|
| | | Brita25 | | Pedrisco 3/8 | | Pó-de-Pedra | | Cal | | | Mínimo | Máximo |
| Pol | (mm) | Total | 38% | Total | 37% | Total | 20% | Total | 5% | 100% | | |
| 1" | 25,0 | 98,2 | 37,3 | 100,0 | 37,0 | 100,0 | 20,0 | 100,0 | 5,0 | 99,3 | 100,0 | 100,0 |
| 3/4" | 19,0 | 37,5 | 14,3 | 100,0 | 37,0 | 100,0 | 20,0 | 100,0 | 5,0 | 76,3 | 80,0 | 98,0 |
| 1/2" | 12,5 | 1,2 | 0,5 | 100,0 | 37,0 | 100,0 | 20,0 | 100,0 | 5,0 | 62,5 | 68,0 | 93,0 |
| nº 4 | 4,8 | 0,1 | 0,0 | 33,3 | 12,3 | 99,8 | 20,0 | 100,0 | 5,0 | 37,3 | 45,0 | 75,0 |
| nº 10 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 3,0 | 1,1 | 77,2 | 15,4 | 100,0 | 5,0 | 21,6 | 32,0 | 62,0 |
| nº 40 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 1,9 | 0,7 | 40,7 | 8,1 | 100,0 | 5,0 | 13,8 | 16,0 | 37,0 |
| nº 80 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 1,2 | 0,4 | 16,3 | 3,3 | 100,0 | 5,0 | 8,7 | 10,0 | 24,0 |
| nº 200 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,7 | 0,3 | 6,0 | 1,2 | 100,0 | 5,0 | 6,5 | 3,0 | 8,0 |

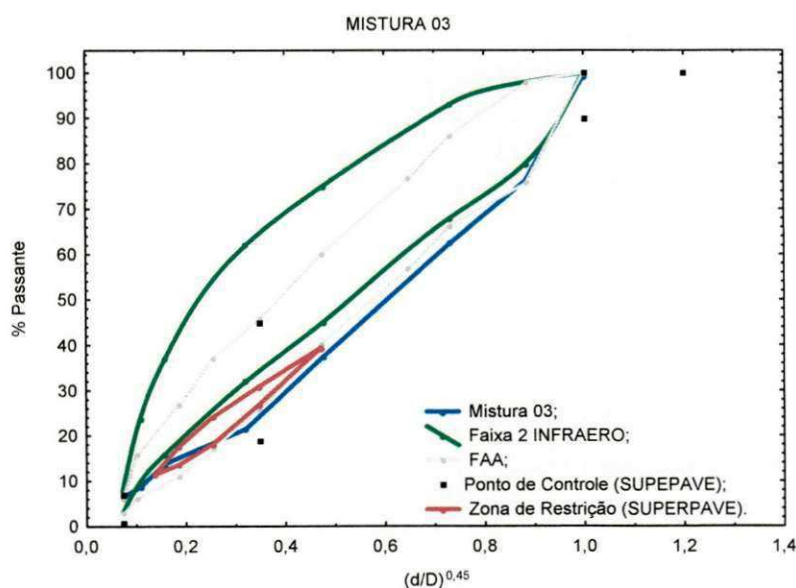
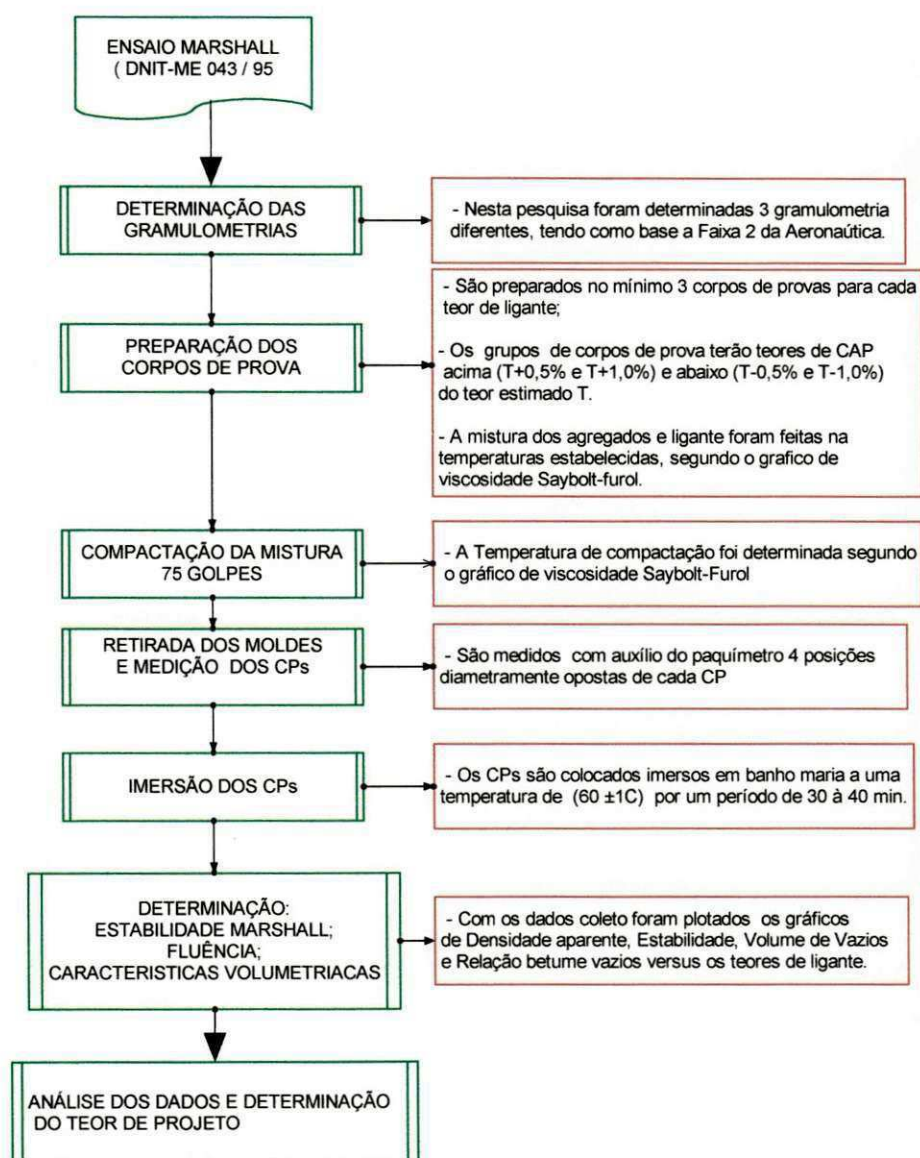


Figura 3.11 Curvas Fuller da Mistura 03.

É importante ressaltar que os cálculos das contribuições de cada agregado para se obter as granulometrias finais das misturas estudadas foram procedidos pelo método das tentativas, com o auxílio de ferramentas do programa Excel.

3.2.4.1 Ensaio Marshall

O ensaio Marshall foi realizado de acordo com a norma ME-043/95 DNIT, cujos procedimentos estão esquematizados na seqüência do ensaio contido no fluxograma 3.2.



Fluxograma 3.2 – Seqüência do Ensaio de Marshall.

A metodologia de dosagem Marshall possui diferentes interpretações para a determinação do teor de projeto, sendo esse o teor que a mistura apresenta os melhores desempenho e comportamento.



Figura 3.12 – Seqüência de procedimentos para as dosagens Marshall feitas nesta pesquisa.

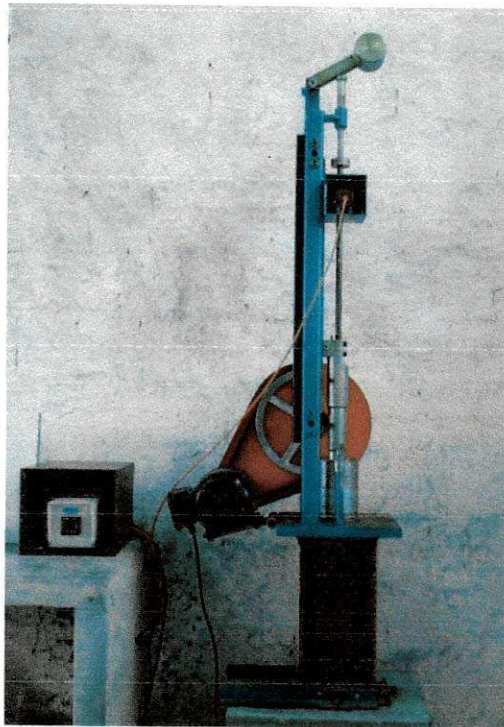
Terceira etapa:

Foi realizada a compactação das misturas com 75 golpes em cada face do CP, utilizando-se para isso o compactador Marshall Mecânico, com o propósito de eliminar possíveis interferências ocasionadas pelo ritmo do operador. Na compactação manual, segundo Aldigueri et al. (2001), a utilização de um mesmo procedimento e apenas variando a forma de compactação, obteve-se uma diferença de 0,6% no teor de projeto para uma mesma mistura analisada, visto que corpos de prova compactados manualmente com uma maior freqüência de golpes pode produzir misturas com massas específicas aparentes maiores que os compactados mecanicamente.

A temperatura de compactação das misturas foi estabelecida com o auxílio da curva viscosidade-temperatura, sendo adotada aquela que apresenta uma viscosidade Saybolt-furol entre 125 SSF e 155 SSF. Para esta pesquisa, os CPs foram compactados sob uma temperatura média de 145°C. A Figura 3.12 mostra a seqüência adotada no procedimento de moldagem dos corpos prova, bem como para o ensaio de ruptura, na prensa Marshall.

Foram determinadas também nesta etapa as propriedades volumétricas das misturas (RBV, VAM, Volume de Vazios, Densidade Aparente), bem como a determinação da estabilidade Marshall e a fluência, após o período de imersão dos corpos de provas em banho-maria, sendo atribuído o valor médio das medidas como o valor a ser utilizado.

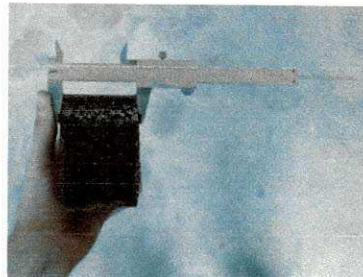
Os ensaios para ruptura dos corpos de prova na prensa Marshall para a determinação da estabilidade e fluência foram realizados de forma randômica, com o objetivo de minimizar os prováveis erros, bem como diminuir possíveis influências das variáveis não-controladas sobre as variáveis respostas. A Figura 3.13 mostra fotos da prensa Marshall usada nos ensaios de ruptura.



(a)

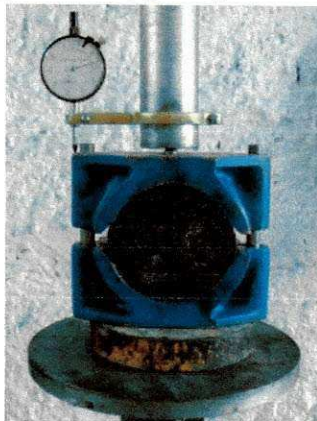


(b)



(c)

Figura 3.13 – (a) Compactador Marshall, (b) Desmoldagem dos CPs, (c) Medição dos CPs.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.14 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio Marshall [(a) Pórtico de Ruptura (b) Banho Maria (c) Prensa + Pórtico de Ruptura].

De acordo com Coelho (1992), a variabilidade nos valores dos parâmetros físicos dos corpos-de-prova (massa específica, volume de vazios e relação betume vazios), inerente ao ensaio Marshall, é relativamente baixa nas misturas para concreto asfáltico. Por outro lado, as dispersões dos parâmetros de resistência mecânica da mistura, medidos através da estabilidade e da fluência são bem mais significativos. O autor indica que os fatores que influenciam nos resultados do método Marshall são:

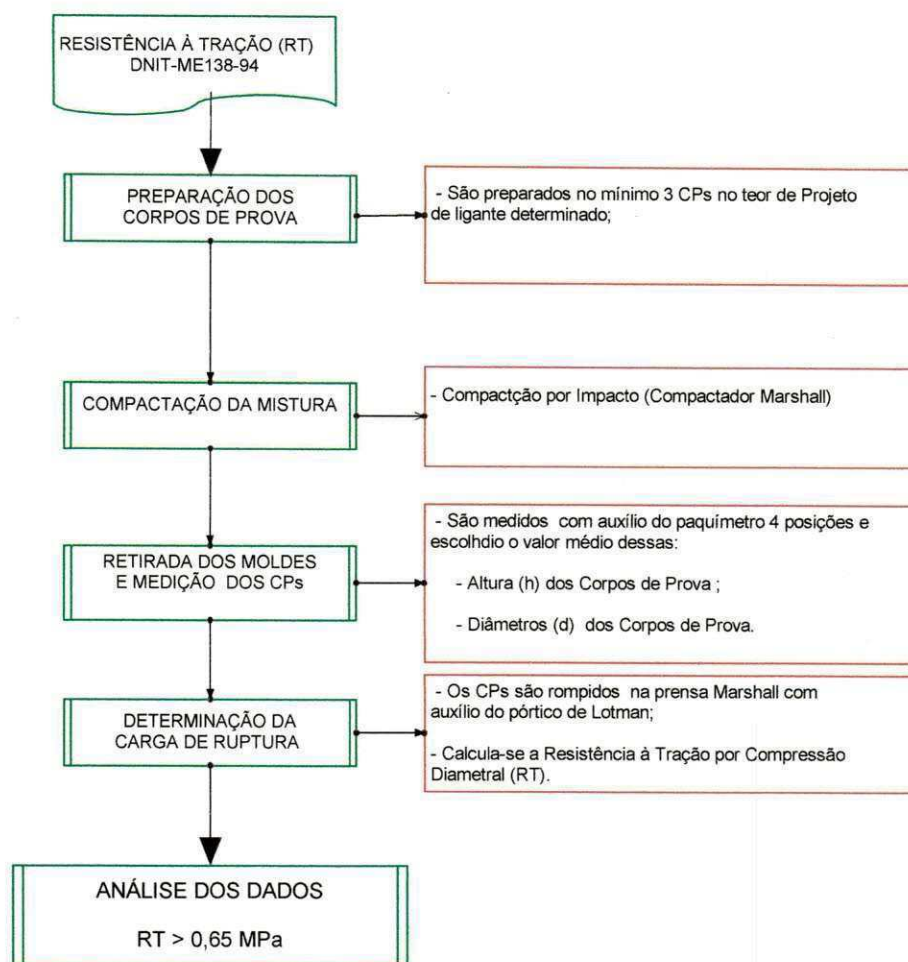
- tempo de mistura, dos diversos materiais envolvidos, insuficiente para obtenção de misturas realmente homogênea;
- compactação ineficiente e em desigualdade de condições;
- controle ineficiente de temperatura dos materiais envolvidos.

Diante de tais considerações, foram adotados procedimentos de controle para minimizar a variabilidade dos parâmetros obtidos do ensaio Marshall.

3.2.5 ENSAIOS DE CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

3.2.5.1 Ensaio de Resistência à Tração – RT

O ensaio para determinação da Resistência Tração por compressão diametral pode ser realizado tanto com corpos de provas moldados em laboratório, quanto com amostras extraídas em campo, sendo que nesta pesquisa os CPs foram moldados em laboratório, em conformidade com a norma ME 138-94 do DNIT. O fluxograma 3.3 mostra a seqüência que foi utilizada no ensaio.



Fluxograma 3.3 - Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.

Neste ensaio foram moldados 3 CPs para cada mistura, utilizando-se os teores de projeto de ligante encontrados segundo os procedimentos do método Marshall.

Os corpos-de-prova foram mantidos a uma temperatura de 30°C durante um período de 2 horas antes da determinação da carga de ruptura na prensa Marshall, com o auxílio do pòrtico de Lottman. Logo em seguida, foi feita a determinação da carga de ruptura e calculado o valor da RT com o emprego da equação 3.1. A Figura 3.14 mostra os equipamentos utilizados para realização do ensaio.

$$RT = \frac{2.F}{100.\pi.D.H} \quad [3.1]$$

RT = Resistência a Tração (MPa);

F = Carga de ruptura, [N];

D = Diâmetro do corpo-de-prova [cm];

H = Altura do corpo-de-prova [cm].

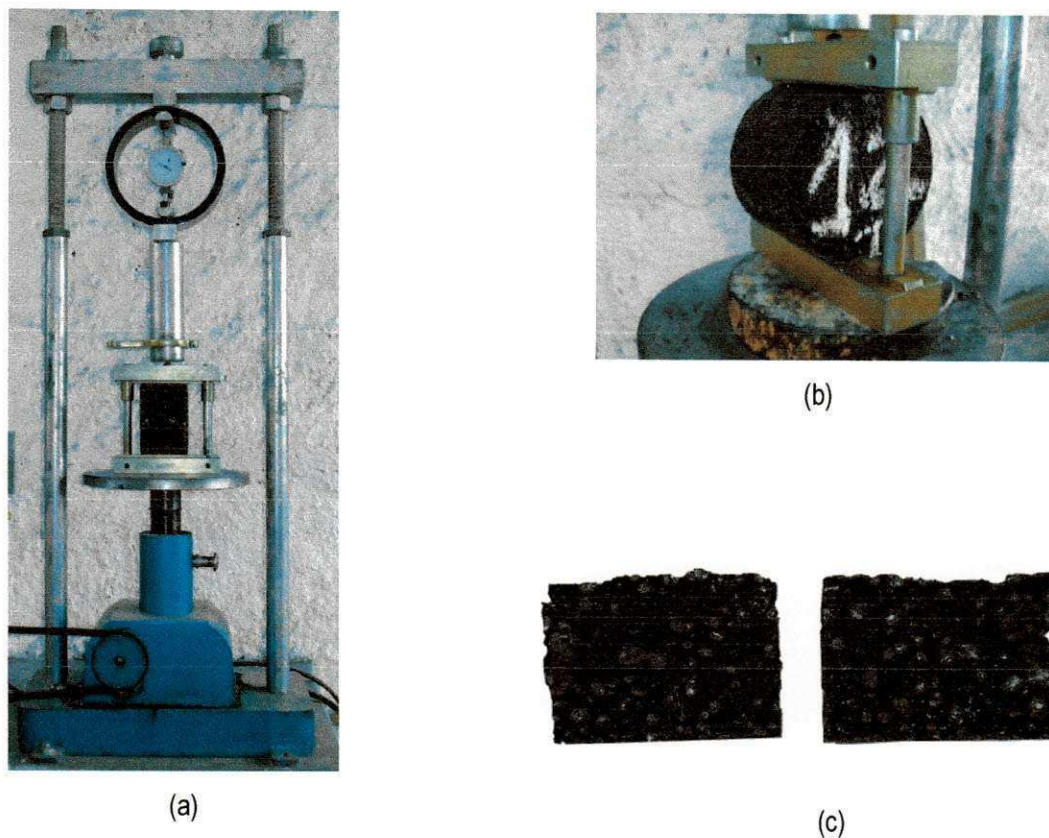


Figura 3.15 - Equipamentos utilizados para realização de Resistência à Tração [(a) , Prensa + Pórtico de ruptura, (b) Pórtico de Ruptura Lobo Carneiro, (c) Corpo-de-prova após aplicação da carga de ruptura).

3.2.5.2 Ensaio de Resistência ao Dano pela Umidade Induzida em Misturas Betuminosas – LOTTOMAN

Para o estudo de sensibilidade à ação deletéria da água, foi adotado o procedimento descrito em AASHTO T 283. O procedimento de ensaio foi elaborado com base no trabalho de R.P. Lottman (NCHRP Project 4-08), e um posterior trabalho realizado por D.G. Tunnicliff e R.E. Root (NCHRP Project10-17), (EPPS et al., 2000; MOURA, 2001).

Segundo AASHTO T 283, os CPs podem ser preparados em laboratório seguindo os métodos Marshall, Hveem ou Superpave. Nesta pesquisa foram utilizados apenas os métodos Marshall.

Para a realização do ensaio foram moldados seis (06) corpos-de-prova, com volume de vazios entre 6 e 8 %. Para cada mistura, foi utilizado o respectivo teor de projeto de ligante, obtido de acordo com a metodologia Marshall. Foi determinada a Resistência à Tração dos três CPs submetidos ao processo de condicionamento. Com o propósito dos CPs apresentarem volumes de vazios entre 6 e 8%, foi necessário variar o número de golpes, compactação no método Marshall com o objetivo de determinar o número de golpes necessário para

que os CPs atingissem valores de volume de vazios estabelecidos pela especificação do ensaio (valores do número de golpes no próximo capítulo).

O ensaio foi dividido em duas etapas:

- Primeira etapa

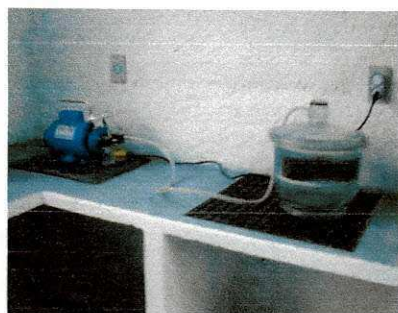
Nesta etapa os corpos-de-prova, sem condicionamento prévio, foram submetidos ao ensaio de resistência à tração com o auxílio do pórtico de Lottman para determinação do valor da resistência à tração por compressão diametral, RT.

-Segunda etapa

Os corpos-de-prova, com condicionamento prévio, foram submetidos ao ensaio de resistência à tração com o auxílio do pórtico de Lottman para determinação do valor da resistência à tração por umidade induzida, RTu.

O procedimento do condicionamento pode ser resumido através dos passos descritos a seguir:.

- aplicação do condicionamento pela saturação a vácuo sobre uma pressão de 254 - 660 mm Hg, com a finalidade de obter saturação entre 55 e 80%;
- colocar-se os três CPs submetidos à saturação para congelamento (-18°C) por um período mínimo de 16 horas. Os CPs devem ser cobertos por um filme plástico, colocados dentro de um saco vedado com 10 ml \pm 0,5 ml de água;
- após o ciclo de congelamento, coloca-se os CPs em um banho a 60°C por um período de 24 \pm 1 hora
- retira-os do banho de 60°C e imergi-los em um banho a 25°C por um período de 2 \pm 1 hora. A Figura 3.16 mostra os equipamentos utilizados o condicionamento dos corpos-de-prova.



(a)



(b)



(c)

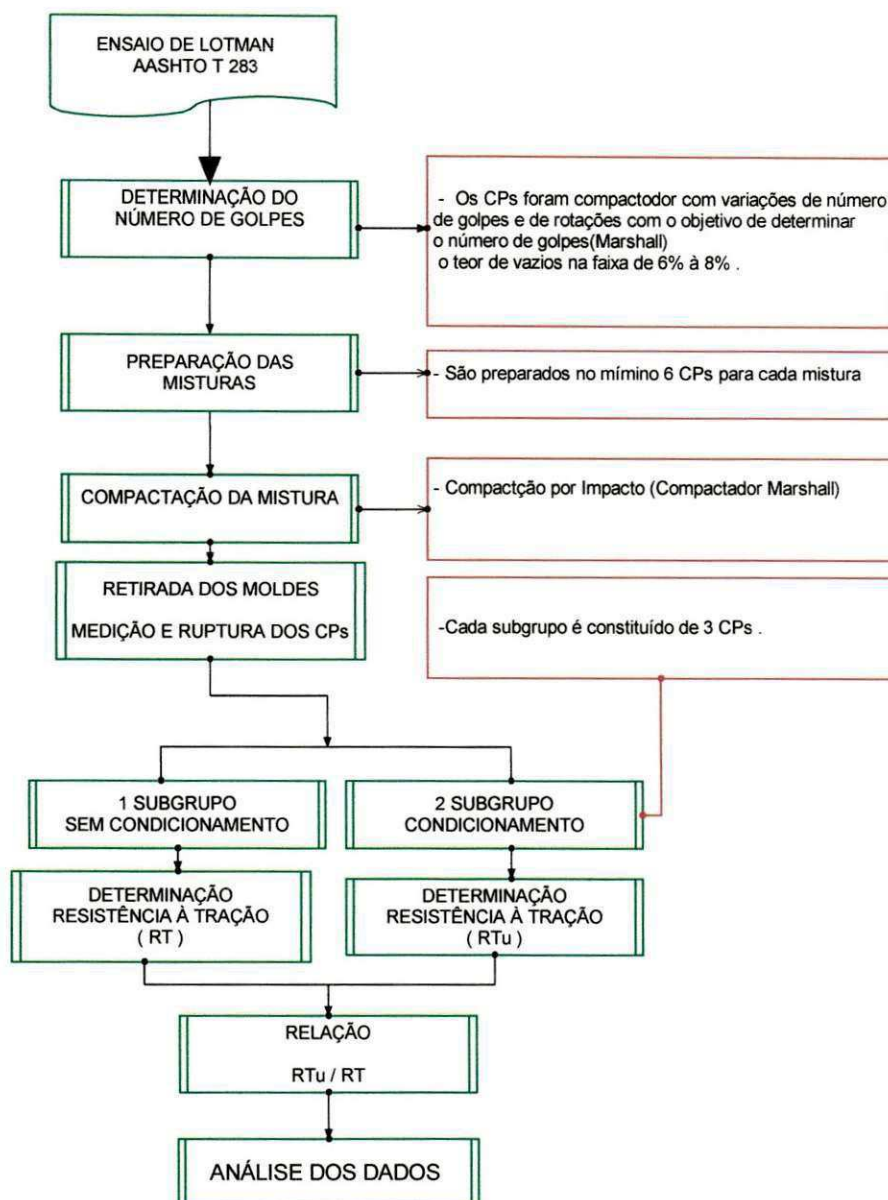


(d)

Figura 3.16 - Equipamentos utilizados Procedimento de condicionamento do ensaio de Lottman

(a) Bomba de vácuo, (b) CPs Papel filme, (c) Ciclo de Congelamento, (d) Banho Maria.

Após a determinação das Resistências à Tração com condicionamento prévio, RT_u , e sem condicionamento, RT foram calculadas a razão entre RT_u e RT . O fluxograma 3.4 mostra de forma resumida as seqüências utilizadas durante a realização do ensaio.



Fluxograma 3.4 – Ensaio de Lottman.

3.2.5.3 Módulo de Resiliência

Os ensaios de Módulo de Resiliência foram realizados no GeoPav - Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFS. A Figura 3.17 mostra uma foto do equipamento utilizado, o Sistema de Ensaios com Misturas Betuminosas e Solos, SIEMBS. Esses ensaios foram realizados em conformidade com os procedimentos da norma DNER-ME 133/94.

Os corpos-de-prova foram ensaiados à temperatura de 30°C com a aplicação de 100 ciclos de carregamento de mesma carga controlados para obter uma deformação entre 0,0020 a 0,0030 mm em cada ciclo de carga, com 0,1 segundos de carregamento e 0,9 segundos de recuperação.

Para este ensaio foram considerados os primeiros 200 ciclos como período de condicionamento, sendo calculado o módulo de resiliência a partir dos 20 últimos ciclos de cada uma das três fases de pós-condicionamento do CP, utilizando a equação seguinte:

$$MR = \frac{F}{100 \cdot \Delta \cdot H} (0,9976 \cdot \mu + 0,2962) \quad [3.2]$$

Onde:

- Mr - Módulo de Resiliência, MPa;
- F - Carga vertical aplicada diametralmente no corpo-de-prova, N;
- Δ - Deformação elástica ou resiliente registrada no oscilógrafo, para 300,400 e 500 aplicações de carga(F), cm;
- H - Altura do corpo-de-prova, cm;
- μ - Coeficiente de Poisson (adotado o valor 0,30).



Figura 3.17 – Foto do equipamento usado para ensaios de resiliência no GeoPav/UFS – SIEMBS.

4.0 CAPÍTULO

4.0 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados, tais como caracterização física dos materiais utilizados, as características mecânicas das misturas, bem como um tratamento estatístico sobre os parâmetros de análise, subsidiando as discussões da pesquisa, tendo por base os objetivos delineados.

4.1 CAL HIDRATADA

A cal hidratada CH-I utilizada nos experimentos apresentou as propriedades físicas mostradas na Tabela 4.1. Por ser um material muito fino, com diâmetros menores que 0,075 mm, a determinação do tamanho das partículas foi obtida com o aparelho analisador de partículas por difração a laser, fornecendo a curva granulométrica da cal, conforme mostrada na Figura 4.0 (ABNT, NBR-6508/84).

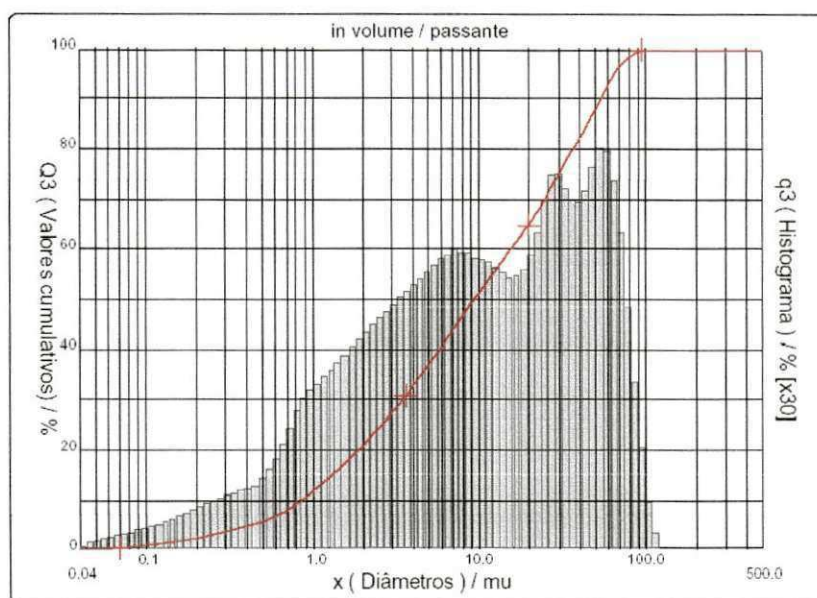


Figura 4.1 - Distribuição dos tamanhos das partículas da cal obtida por difração a laser.

Tabela 4.1– Massa específica real da Cal Hidratada tipo CH-I.

| A Cal Hidratada CH-I | Massa específica real (g/cm ³) |
|----------------------|--|
| | 2,535 |

Foi utilizada a cal hidratada como material de preenchimento por proporcionar um melhor desempenho nas misturas asfálticas, quando comparada com a utilização de cimento Portland. Segundo WESSELING (2004), a adição da cal como filer proporciona valores de módulo de resiliência e resistência à tração mais elevados, bem como uma maior adesividade entre o mástique e os agregados.

4.1.2 TEMPERATURA DE TRABALHO

As temperaturas de trabalho que foram utilizadas nesta pesquisa foram determinadas, segundo o gráfico de viscosidade-temperatura elaborado através do ensaio de viscosidade Saybol-Furol. A Figura 4.2 mostra o gráfico da viscosidade Saybolt-Furol com as faixas de temperatura de compactação e aquecimento do ligante. De acordo com as especificações, as temperaturas de aquecimento do ligante devem apresentar uma “viscosidade” Saybolt-furol compreendida na faixa de 75 SSF a 150 SSF de preferência entre 85 ± 10 SSF de modo que a temperatura do ligante não seja inferior a 107°C ou superior a 177°C , pois temperaturas altas podem provocar o surgimento de patologias prematuras nas misturas asfálticas. Nesta pesquisa foi utilizada a temperatura de 157°C para o aquecimento do ligante, e de 167°C para os agregados, bem como a temperatura de compactação deve ser aquela que apresenta uma viscosidade Saybolt-furol de 125 SSF a 155 SSF, nesta pesquisa a uma temperatura média de 145°C . A Tabela 4.2 mostra as temperaturas utilizadas nas misturas.

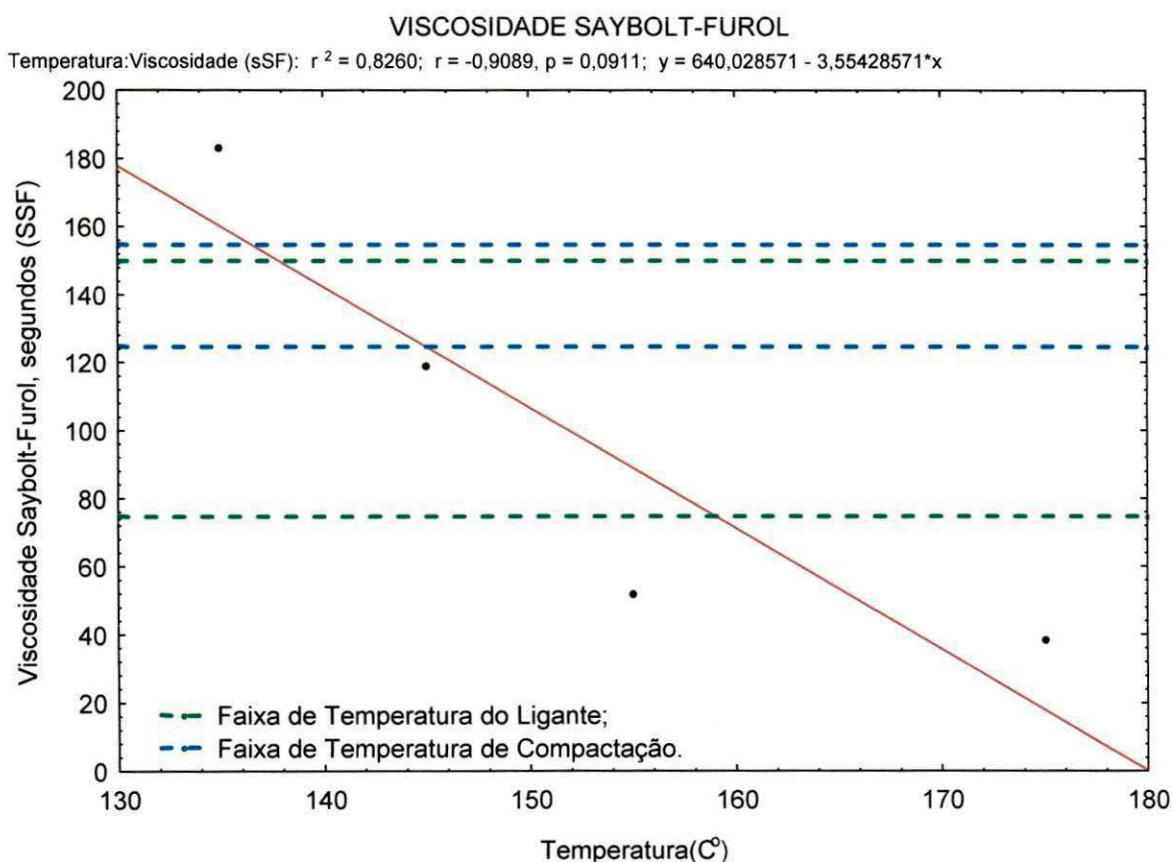


Figura 4.2 – Gráfico de Viscosidade Saybolt-Furol em função da temperatura.

Tabela 4.2 – Temperatura de trabalho do ligante.

| | Ligante | Agregado | Compactação |
|-------------------|---------|----------|-------------|
| Temperatura (°C) | 157 | 167 | 145 |

O ajuste do gráfico viscosidade-Temperatura apresentou um coeficiente de determinação R^2 de 0,826.

A temperatura do agregado corresponde à temperatura do ligante mais 10 °C (Pinto, 2003).

4.2 DOSAGENS DAS MISTURAS

4.2.1 METODOLOGIA MARSHALL

O ensaio Marshall foi realizado segundo a norma ME 043/95, preconizada pelo DNIT, com objetivo de determinar o teor de projeto de ligante para cada mistura estudada, esse teor foi selecionado através dos critérios da aeronáutica, com relação à Estabilidade, volume de vazios, relação betume vazios e vazios de agregados minerais.

4.2.1.1 Dosagem das Misturas

Mistura 01

A mistura 01 apresenta uma granulometria contínua e enquadrada na faixa 2 da aeronáutica (conforme mostrado na Capítulo 3), cuja mistura apresenta os seguintes agregados na sua composição e proporções em massa:

Brita 25 = 15%;

Brita 19 = 18% ;

Pedrisco 3/8" = 22% ;

Pó-de-Pedra = 40% ;

A cal hidratada CH-I(Filer) = 5% .

Mistura 02

A mistura 02, que está enquadrada no limite superior da faixa 2 da aeronáutica (mostrado no Capítulo 3), possui "granulometria fina", sendo constituída pelos agregados nas seguintes proporções:

Brita 19 = 10% ;

Pedrisco 3/8" = 20% ;

Pó-de-Pedra = 35% ;

Areia de Campo = 30%

A cal hidratada CH-I(Filer) = 5% .

Mistura 03

A Mistura 03 apresenta uma "granulometria grossa", e sua curva granulométrica foi enquadrada abaixo do limite inferior da faixa 2 da aeronáutica, e bem próximo do limite inferior da faixa 2 preconizada pela Agencia Federal Americana de Aeronáutica FAA (mostrado no Capítulo 3). Suas proporções adotadas de agregados são:

Brita 25 = 38% ,

Pedrisco 3/8" = 37%;

Pó-de-Pedra = 20%;

A cal hidratada CH-I (Filer) = 5%.

Para estas misturas foram determinadas as estabilidades, e as características volumétricas das misturas com a variação do teor de ligante de acordo com a metodologia Marshall. Os resultados de todas as misturas estão apresentados nos ANEXOS A e B, onde constam as características volumétricas e estabilidade das misturas. A Figura 4.3 e 4.4 mostra os gráficos de Estabilidade, Massa específica Aparente, RBV, VAM, %

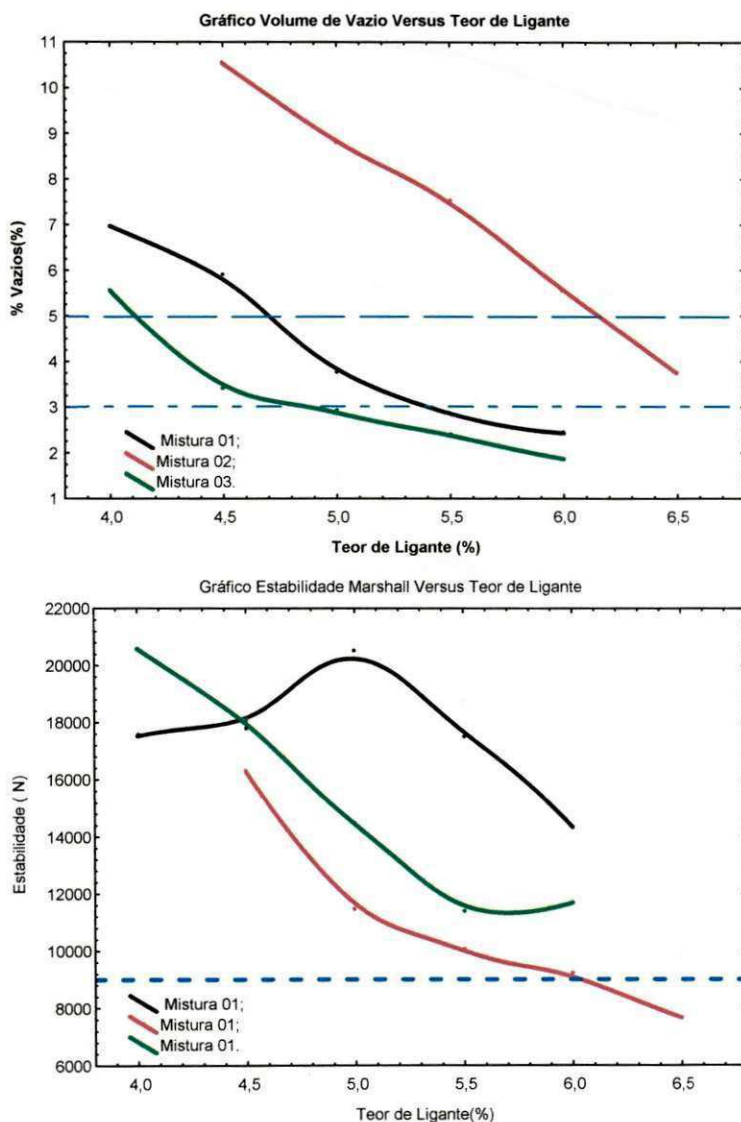


Figura 4.3 – Gráficos de Estabilidade, % V.

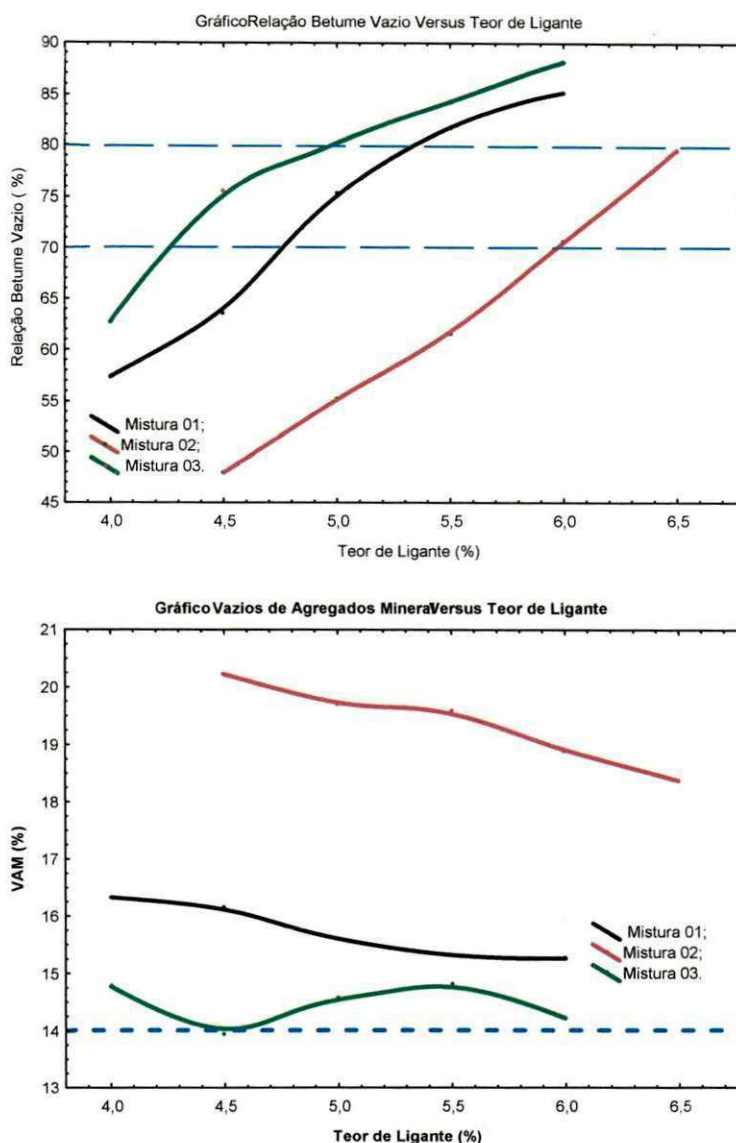


Figura 4.4 – Gráficos de Relação Betume Vazios, Vazios de Agregados Minerais.

Através da análise dos dados colocados nos gráficos, os teores de projeto de ligante das misturas foram 4,9% para mistura 01, 6,4% para Mistura 02, e 4,4% para Mistura 03, pois satisfizeram aos requisitos estabelecidos pela aeronáutica.

Após a determinação dos teores de projeto foram moldados, segundo metodologia Marshall, 3CPs no teor de projeto, para cada mistura estudada com o objetivo de confirmação das propriedades volumétricas e estabilidade Marshall das misturas. A Tabela 4.3 mostra os resultados das características das misturas no teor de projeto de ligante.

Tabela 4.3 - Resultados das características das misturas nos teores de projeto de ligante.

| | Teor de Projeto de Ligante (%) | Massa Específica | | % VAZIOS (%) | VAM (%) | RBV (%) | Estabilidade (N) |
|---------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|--------------|---------|---------|------------------|
| | | Aparente | Teórica | | | | |
| | | g/cm ³ | g/cm ³ | | | | |
| Mistura 01 | 4,9 | 2,358 | 2,464 | 4,20 | 15,55 | 72,48 | 15.931 |
| Desvio Padrão | | 0,00463 | - | 0,18786 | 0,16574 | 0,91841 | 6,93994 |
| Mistura 02 | 6,4 | 2,305 | 2,403 | 4,06 | 18,45 | 77,98 | 10.750 |
| Desvio Padrão | | 0,00269 | - | 0,11216 | 0,09534 | 0,49454 | 54,43087 |
| Mistura 03 | 4,4 | 2,390 | 2,487 | 3,87 | 14,13 | 72,64 | 16.358 |
| Desvio Padrão | | 0,00825 | - | 0,33161 | 0,29622 | 1,75502 | 28,78361 |

Na Tabela 4.4 mostra-se uma confrontação entre os valores encontrados nos ensaios com teores de projeto de ligante com os critérios da aeronáutica e FAA, para revestimentos destinados a operação de aeronaves de massa bruta superior a 30.000 kg ou dotadas de pneus de pressões superiores a 700 kPa.

Tabela 4.4 – Características do revestimento segundo critérios da Aeronáutica e FAA.

| CARACTERÍSTICAS | CRITÉRIOS (INFRAERO) | CRITÉRIOS (FAA) | MISTURA | MISTURA | MISTURA |
|---------------------------------|----------------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|
| | | | 01 (Tp 4,9%) | 02 (Tp 6,4%) | 03... (Tp 4,4%) |
| Estabilidade Marshall (Kgf) | > 800,0 | > 955,5 | 1.593,1 | 1.075,0 | 1.635,8 |
| Volume de vazios (%) | 3 à 5 | 2,8 à 4,2 | 4,2 | 4,06 | 3,87 |
| Relação Betume Vazio (%) | 70 à 80 | 70 à 80 | 72,48 | 77,98 | 72,64 |
| Vazios de Agregados Minerais(%) | > 13 | > 14 | 15,55 | 18,45 | 14,13 |

Pela análise dos resultados da dosagem Marshall foi observado que todas as misturas estudadas apresentaram valores satisfatórios, segundo as características volumétricas e a estabilidade Marshall, pois atenderam aos critérios preconizados pela Infraero. Foi observado também que mesmo a mistura 03, ou seja, a que apresenta granulometria abaixo do limite inferior, fora da faixa 2, obtiveram resultados satisfatórios.

A mistura 2, que tem granulometria próxima do limite superior da faixa de referência, apresentou um teor de ligante de projeto igual a 6,4%, o que pode comprometer a mistura devido ao aparecimento de patologias como corrugação, exsudação, escorregamento de massa, entre outras.

É importante ressaltar que devido ao fato da mistura 2 possuir uma granulometria "mais fina", pode apresentar uma macroestrutura fechada, afetando assim a aderência do sistema pavimento-aeronave, podendo estar mais susceptível em dias chuvosos ao aparecimento do fenômeno de hidroplanagem.

4.3 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS MISTURAS

O comportamento mecânico das misturas asfálticas em estudo foram avaliadas segundo os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (DNIT- ME 138-94), Módulo de Resiliência (DNIT- ME 133/94) e Resistência ao Dano pela Umidade Induzida em Misturas Betuminosas – LOTMANN (AASHTO T 283).

Sabe-se que os critérios volumétricos e de estabilidade e fluência para estabelecer o teor de projeto de uma mistura não garante que esse o teor seja o melhor para o comportamento das misturas betuminosas. Com a proposta do método de dosagem racional (mecânico), que consiste na análise de deformações e tensões em meios elásticos, recomenda-se que a dosagem seja realizada com certos níveis de resistência à tração e Módulo de Resiliência para que a estrutura do pavimento não sofra redução na sua vida útil.

4.3.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os ensaios tração por compressão diametral foram realizados segundo metodologia já descrita no capítulo anterior, com o objetivo de verificar a influência das granulometrias das misturas nos valores da RT, sabendo-se que essa faz parte de recomendações do critério de dosagem racional. Logo, foram moldados 3 CPs para cada mistura, no teor de projeto de ligante determinado de acordo com as metodologias descritas anteriormente, para a realização dos ensaios. Na Tabela 4.5 são apresentados os valores de RT para cada mistura segundo o processo de dosagem Marshall.

Tabela 4.5 – Resultados do ensaio de Resistência a Tração (RT) da Misturas a 30°C.

| | | Teor de Projeto (%) | RT (MPa) | Desvio Padrão |
|------------------------------------|------------|---------------------|----------|---------------|
| Compactação por impacto (MARSHALL) | Mistura 01 | 4,9 | 0,83 | 0,0684 |
| | Mistura 02 | 6,4 | 0,63 | 0,0176 |
| | Mistura 03 | 4,4 | 0,96 | 0,0876 |

Com a realização do ensaio de RT foi observado que a mistura 2, apresentou valor inferior ao estabelecido por norma (>0,65 MPa) e as misturas 1 e 3 foi verificado que apresentaram valores satisfatório.

A mistura 3, que apresenta granulometria abaixo da faixa 2 da Infraero, ou seja, fora da faixa em estudo apresentou valores satisfatórios.

4.3.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO DANO PELA UMIDADE INDUZIDA EM MISTURAS BETUMINOSAS – LOTMAN

Com o propósito de estudar a ação deletéria da água nas misturas asfálticas, foi realizado o ensaio de Lottman, segundo a norma AASHTO T 283, onde, para atender um dos requisitos do ensaio, foram moldados corpos de provas no teor de projeto de ligante, com variações nos números de golpes para determinar o valor que proporciona uma percentagem de volume de vazios nas misturas entre 6 e 8% . Das Figuras 4.5 a 4.7o são mostrados os gráficos do número de golpes versus percentual de vazios de cada mistura, e, de maneira resumida, na Tabela 4.6 são apresentados os números de golpes necessários para se obter os vazios exigidos em norma para as misturas Marshall.

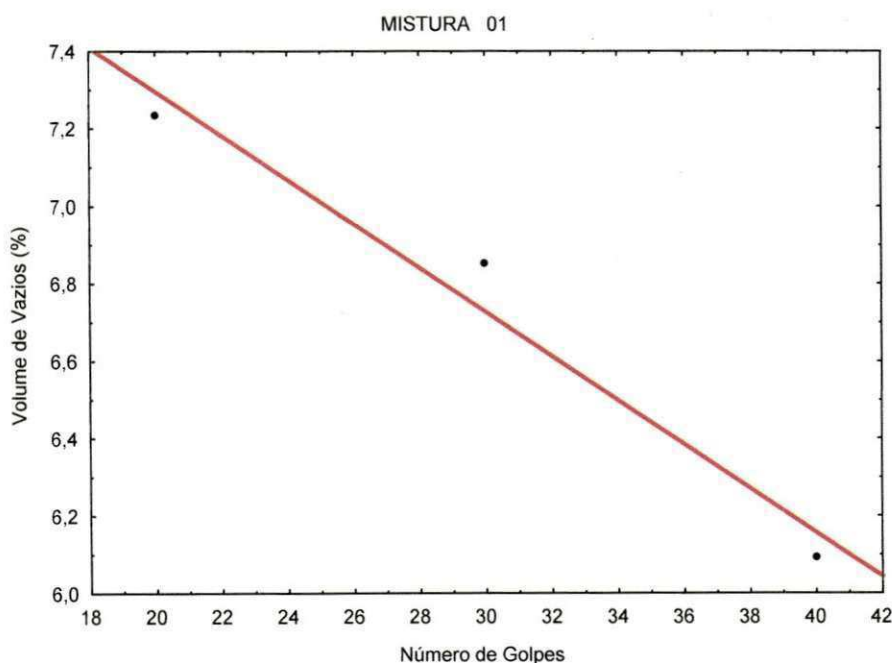


Figura 4.5 – Gráfico para obtenção no número de golpes para o ensaio de Lotman realizado com a mistura 1.

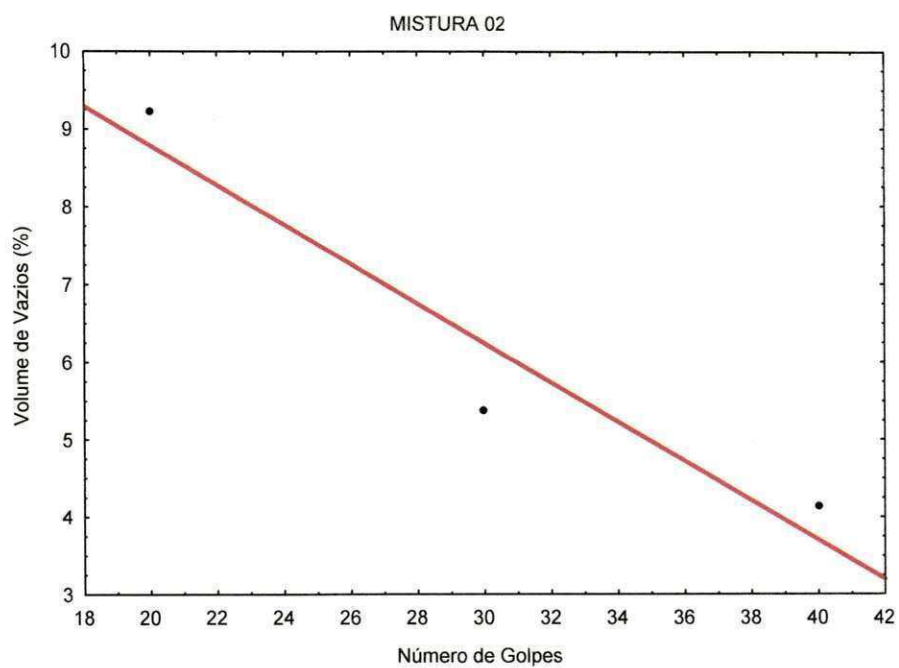


Figura 4.5 – Gráfico para obtenção no número de golpes para o ensaio de Lottmann realizado com a mistura 2.

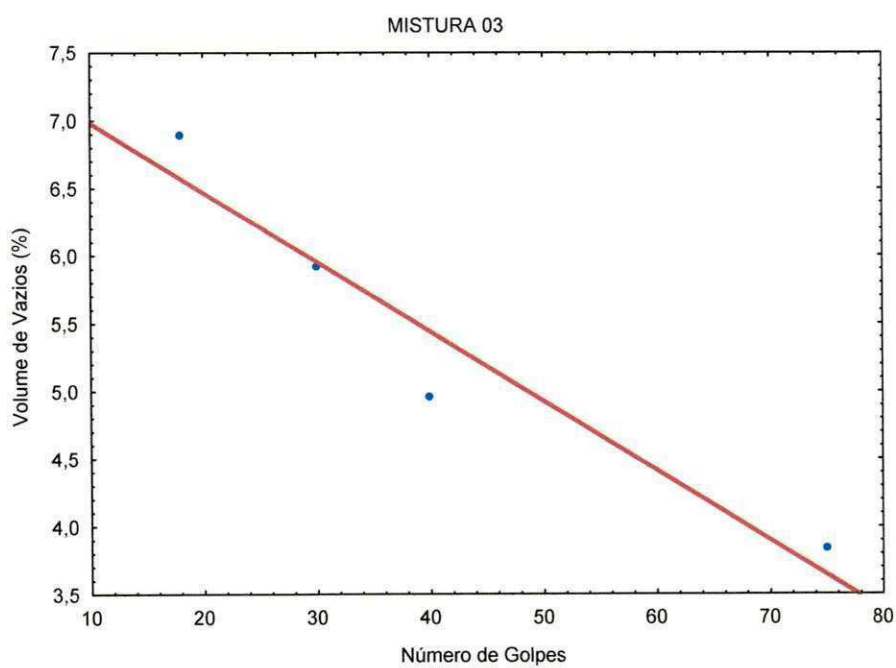


Figura 4.6 – Gráfico para obtenção no número de golpes para o ensaio de Lottman realizado com a mistura 3.

Tabela 4.6 Número de golpes para obtenção dos volumes de vazios entre 6 e 8% das misturas.

| | Coeficiente de Correlação Linear R ² | Número de Golpes |
|------------|--|------------------|
| Mistura 01 | 0,9650 | 34 |
| Mistura 02 | 0,9174 | 30 |
| Mistura 03 | 0,9268 | 18 |

Na Tabela 4.7 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de Lottman.

Tabela 4.7 Valores obtidos do ensaio de Lottman.

| | | Teor de Projeto (%) | RT (MPa) | RTu (MPa) | RRT= RTu /RT |
|--|------------|------------------------|-------------|--------------|-----------------|
| Compactação por impacto (MARSHALL) | Mistura 01 | 4,9 | 0,62 | 0,52 | 84% |
| | Mistura 02 | 6,4 | 0,63 | 0,42 | 67% |
| | Mistura 03 | 4,4 | 0,48 | 0,44 | 92% |

A partir da análise dos dados de umidade induzida nas misturas estudadas foi observado que a mistura 02 não apresentou valores satisfatório, segundo critérios estabelecidos pela metodologia SUPERPAVE (RRT >80%) e AASHTO (RRT>70%) mostrando que esta mistura mesmo utilizando a cal como filer, não apresenta bom comportamento contra a ação deletéria à ação da água. Isso indica que as misturas que apresentam granulometria próximo ao limites superior tendem a não satisfazerem aos valores preconizados de resistência a tração e de RRT. Por outro lado, a mistura 3, apesar de apresentar granulometria fora dos limites da faixa 2, apresentou valores satisfatórios de RRT.

4.3.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Com o objetivo de determinar a variação do Módulo de Resiliência dentro da mesma faixa granulométrica em estudo foi realizado o ensaio através do SIEMBS, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 Resultado do ensaio de Módulo de Resiliência (30° C).

| Teor de Projeto (%) | Módulo de Resiliência (MPa) |
|------------------------|-----------------------------------|
|------------------------|-----------------------------------|

| | | |
|------------|-----|------|
| Mistura 01 | 4,9 | 3402 |
| Mistura 02 | 6,4 | 3369 |
| Mistura 03 | 4,4 | 3566 |

Segundo Baibo (2007), a relação entre o valor de módulo de resiliência e a resistência à tração do material tem sido empregada simultaneamente em projetos de dosagens de misturas asfálticas. Na Tabela 4.9 são mostrados os valores dessa relação encontrada nesta pesquisa.

Tabela 4.9 Resultado da razão MR/ RT das misturas estudadas.

| | Teor de Projeto (%) | MR (MPa) | RT (MPa) | MR/RT |
|------------|------------------------|-------------|-------------|-------|
| Mistura 01 | 4,9 | 3402 | 0,83 | 4098 |
| Mistura 02 | 6,4 | 3369 | 0,63 | 5348 |
| Mistura 03 | 4,4 | 3566 | 0,96 | 3715 |

OBS.: RT e MR obtidos a 30° C.

Segundo Vasconcelos (2004), alguns pesquisadores acreditam que quanto menor a relação MR/RT maior será a vida de fadiga obtida pela mistura. Além disso, foi observado através dessa relação que misturas com granulometrias próximas ao limite superior da faixa 2 da aeronáutica tendem a apresentar uma menor vida de fadiga que as misturas com granulometria que se distancia desse limite.

A Tabela 4.10 mostra os resultados das características mecânicas das misturas em estudo. Da Tabela 4.10 se pode observar que misturas próximas ao limite superior da faixa em questão devem ser evitadas, pois apesar de apresentar valores aceitáveis segundo as características de volumetria e de estabilidade Marshall, quando se faz uma análise das suas características mecânicas, conclui-se que os valores são insatisfatórios.

Tabela 4.10 Resumo dos resultados das características mecânicas das misturas em estudo.

| | Teor de Projeto (%) | RT (MPa) | RRT (%) | MR (MPa) | MR/RT |
|------------|------------------------|-------------|------------|-------------|-------|
| Mistura 01 | 4,9 | 0,83 | 84% | 3402 | 4098 |
| Mistura 02 | 6,4 | 0,63 | 63% | 3369 | 5348 |
| Mistura 03 | 4,4 | 0,96 | 92% | 3566 | 3715 |

OBS.: RT e MR obtidos a 30° C.

CAPÍTULO 5

5.0 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

O objetivo principal desta pesquisa foi verificar a influência da granulometria estabelecida numa mesma faixa granulométrica na variação do teor de ligante, bem como nas características físicas e mecânicas das misturas asfálticas. Para o comportamento mecânico foram avaliados os valores do Módulo de Resiliência (MR) e da Resistência à Tração por compressão diametral (RT), bem como foi também avaliada a influência da granulometria sobre a resistência ao dano causado pela umidade induzida. Das análises efetuadas, foi possível extrair as seguintes conclusões:

- a) Quanto às características volumétricas das misturas, todas apresentaram resultados que podem ser considerados satisfatórios, tomando-se por base os critérios estabelecidos pela Infraero.
- b) Quanto à variação do teor de ligante, foi observado que dentro da mesma faixa é possível ocorrer uma variação de ligante na ordem de 2% para as misturas estudadas, sendo que a mistura próxima ao limite superior revelou a tendência de apresentar teor de ligante de projeto maior.
- c) No que se refere à influência da granulometria na resistência à tração (RT) das misturas, foi observado que a mistura dosada com granulometria próxima ao limite superior da faixa 2 não apresentou valor aceitável ($<0,65$ MPa) de RT, o que indica que deve-se evitar dosagens de misturas com essa característica;
- d) Da análise dos dados de Módulo de Resiliência, foi observada uma variação média nos valores de MR na faixa 2, de 164 MPa, sendo verificado um crescimento do MR à medida que a mistura apresenta uma granulometria mais próxima do limite inferior da faixa, o que está compatível com a conclusão anterior.
- e) Quanto à susceptibilidade das misturas asfálticas à presença d'água, constatou-se que mesmo com a utilização da cal como filer, o valor da RRT da mistura com granulometria próxima do limite superior, a MISTURA 2, não apresentou resultado satisfatório, visto que o valor médio encontrado (67%) foi inferior ao estabelecido pela metodologia SUPERPAVE, que é 80%. As demais misturas apresentaram valores superiores ao da mistura 2, e foram consideradas aceitáveis.

- f) Observou-se que, mesmo a mistura 3, aquela dosada com granulometria abaixo do limite inferior da faixa 2 da INFRAERO, as características volumétricas e mecânicas foram satisfatórias quanto aos critérios estabelecidos pela norma da Infraero.
- g) Cabe frisar que a partir das análises de comportamento mecânico das misturas estudadas, foi possível observar a marcante influência da escolha da granulometria dentro dos limites de uma mesma faixa granulométrica. Nesta pesquisa, a Mistura 2, situada próxima do limite superior da Faixa 2 da Infraero, apresentou um dosagem satisfatória quando observado apenas os critérios volumétricos. Porém, através de uma análise das características mecânicas, essa mistura apresentou resultados abaixo dos estabelecidos, o que a torna dentro das misturas estudadas a mais susceptível ao aparecimento de patologias prematuras, como corrugação, exsudação e escorregamento de massa.
- f) Por fim, ressalta-se que a faixa granulométrica 2 para misturas asfálticas, preconizada pela Infraero, parece apresentar intervalos de confiança relativamente grandes, o que pode ocasionar misturas que atendam aos critérios volumétricos, mas que do ponto de vista de seu comportamento mecânico ela produza resultados insatisfatórios, podendo gerar uma região de desconfiança dentro do intervalo granulométrico estabelecido pela norma.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Efetuar um estudo comparativo sobre a dosagem de misturas asfálticas para aeródromos utilizando-se as metodologias Marshall e SUPERPAVE.
- Analisar a influência da variação da granulometria e da temperatura sobre o Módulo de Resiliência de misturas asfálticas.
- Estudar outras faixas granulométricas para misturas asfálticas da Aeronáutica para verificação das características mecânicas dos limites dessas.
- Ampliar o banco de dados de misturas dosadas de maneira semelhante e realizar mais ensaios de MR e de dano por umidade induzida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALDIGUERI D. R., SILVEIRA, M. A. e SOARES, J. B., Estudo Comparativo entre Compactação Manual e Automática de Misturas Asfálticas. Anais da 33a Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Florianópolis, 2001.
- AMARAL, S. C., Estudos de Misturas Asfálticas Densas com Agregados do Estado do Pará, Utilizando Asfalto Convencional (CAP-40) e Asfalto Modificado Com Polímero SBS (Betuflex B 65/60), Dissertação de Mestrado, USP – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos – SP, 2000.
- ANDERSON, M. R., BOSLEY, R. D., CREAMER, P. A., "Quality Management of HMA Construction Using Superpave Equipment: A Case Study". Transportation Research Record 1513, Transportation Research Board, pp. 18-24, Washington, D. C, 1995.
- BALBO, T.J., Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projetos e Restauração, São Paulo, Oficina de Texto, 2007.
- BERNUCCI B. L, MOTTA, G. M. L , CERATTI, P.A.J, SOARES, B.J, Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros, Petrobras , ABEDA, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- BEZERRA NETO, R. S., Análise Comparativa De Pavimentos Dimensionados Através Dos Métodos Empírico Do DNER e Mecanístico e Proposta de um Catálogo Simplificado de Pavimentos para a Região de Campo Grande (Ms), Dissertação de Mestrado, Engenharia de Transportes, São Carlos, SP, 2004.
- BUKOWSKI, J. R. Guidelines for design Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavements (RAP), Lexington, KY USA, .1994.
- BUNCHER, M & DUVAL, J. P.E., Superpave for Airports, Instituto de Asfalto, 2003.
- CASTELO BRANCO, V. T. F., Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- CASTRO NETO, A. M., Determinação da Densidade Máxima Teórica de Misturas Betuminosas. 30ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Salvador, v.1, 1996.
- COELHO, W. e SÓRIA, M. H. A., Variabilidade dos Resultados do Método Marshall. 11º Encontro de Asfalto, IBP, Rio de Janeiro, RJ, 1992.

D'ANGELO, J. D. & ANDERSON, R. M., Material Production, Mix Design, and Pavement Design Effects on Moisture Damage. In: Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements, San Diego, Transportation Research Board, California, 2003.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. Pesquisa de Asfaltos Modificados por Polímeros – Relatório Final. Ministério dos Transportes. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Tomo I e II, 2008.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, EM 367/97, Material de Enchimento para Misturas Betuminosas, Rio de Janeiro, 1997.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ES 313/97. Pavimentação – Concreto Betuminoso – Norma Rodoviária. Rio de Janeiro, 1997.

_____, ME 083/98. Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

_____, ME 081/98. Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

_____, ME 084/95. Agregado miúdo – Determinação da Densidade Real. Rio de Janeiro, 1995.

_____, ME 051/94. Solos – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1994.

_____, ME 093/94. Solos – Determinação da Densidade Real. Rio de Janeiro, 1994.

_____, ME 054/97. Equivalente de Areia. Rio de Janeiro, 1997.

_____, ME 078/94. Agregado Graúdo – Adesividade ao ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

_____, ME 003/99. Material Betuminoso – Determinação da Penetração. Rio de Janeiro, 1999.

_____, ME 148/94. Material Betuminoso – Determinação do Ponto de Fulgor e de Combustão. Rio de Janeiro, 1994.

_____, ME 213/94. Solos – Determinação do Teor de Umidade. Rio de Janeiro, 1994.

_____, ME 138/94. Misturas betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral. Rio de Janeiro, 1994.

_____, ME 117/94. Mistura betuminosa – Determinação da Densidade Aparente. Rio de Janeiro, 1994.

_____, ME 043/95. Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

_____, ES 031/04. Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificações de Serviços, 2004.

FERNANDES JR., L.J. & GOUVEIA, L. T., Efeitos Da Energia De Compactação Sobre O VAM e O RBV de Misturas Asfálticas, 18° ENCONTRO DE ASFALTO, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 2006.

FERNANDES, M. W. Q., Utilização de Resíduos Sólidos no Estudo da Susceptibilidade à Presença D'Água. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil e Ambiental, UFCG, 2007.

HARMAN, T.; BUKOWSKI, J. R; MONTIER F., et al., The History and Future Challenges of Giratory Compaction 1939 to 2001. In: Transportation Research Board - TRB, Washington, USA, 2002.

HISLOP, W.P.; COREE, B. J, VMA as a Design Parameter in Hot-Mix Asphalt. Mid-Continent Transportation Symposium Proceedings, p. 24-29, 2000.

KANDHAL.P.S; COLLEY JR., Coarse Versus Fine-Graded Superpave Mixtures Comparative Evaluation of Resistance To Rutting, 81th Annual Meeting of Transportation Research Board , Washington, USA..

LEAL, C. L. D. & CASTRO, P. F., Concreto Asfalto: Utilização de Resíduos como Filer, In : 35^a Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, 2000.

LEAHY, R. B., MCGENNIS,R. B., Asphalt Mixes Materials Design and Characterization Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist, 1999.

LEITE et al., Princípios do Projeto e Análise SUPERPAVE de Misturas Asfálticas. Petróleo Brasileiro S.A - PETROBAS, Rio de Janeiro ,1996.

LOMBARDI, B. Du Pétrole Bruta au Bitume: La Longue Marche. Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, n.707, p. 25-28, 1983.

MASAD, E; T. AL-ROUSAN; J.BUTTON; D.LITTLER and E.TUTUMLUER,Test Methods for Characterizing Aggregate Shape Texture and Angularity NCHRP, Final Report. Transportations Research Board, National Research council, 2005.

MARQUES, G. L. O., Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica; Efeito da Compactação por Impacto e Giratória,Tese de Doutorado, COPPE / UFRJ, Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, J., Mecânica dos Pavimentos. Rio de Janeiro-RJ, Editora UFRJ, 2007.

MOTTA, L. M. G., TONIAL, I., LEITE, L. M., et al., Princípios do Projeto e Análise SUPERPAVE de Misturas Asfálticas. Tradução Comentada, Instituto Brasileiro do Petróleo – IBP, 1996.

MOTTA, L. M. G.; Tonial, I.; Leite, L. M., et al, Princípio do Projeto e Análise SUPERPAVE de Misturas Asfálticas. Tradução Comentada da Publicação FHWA- SA-95-003, Federal Highway Administration, Instituto Brasileiro do Petróleo, 1996..

NSMA 85-2, Ministério da Aeronáutica , Norma de Infra Estrutura, 1985.

OLIVEIRA FILHO, C. M. S, Estudo de Diferentes Granulometria no Comportamento Mecânico das Misturas Asfálticas Densas e Descontínuas Tipo Stone Matrix Asphalt SMA, Dissertação de Mestrado, PETRAN/UFC, Fortaleza, CE, 2007.

PINTO, S. & PREUSSLER, E. S., Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis. 2ª ed. Rio de Janeiro, Copiarte, 2002.

PINTO, S., Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicações na Avaliação Estrutural de Pavimentos, Tese de Doutorado, COPPE / UFRJ, Engenharia Civil, Rio de Janeiro 1991.

PINTO, S., Materiais Betuminosos , IME, Departamento de Engenharia de Fortificação e Construção - DE/2, Rio de Janeiro 2004.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S., Módulos de Resiliência de Concreto Asfálticos , IN: 5º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro , Anais, 52p, 1980.

ROBERTS, F. L. et al., Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction, Napa Research and Education Foundation, Second Edition, Maryland, USA, 1996.

SCHMITT, R. L.; HANNA, A. S.; RUSSEL, J. S.; NORDHEIM, E. V., Pavement Density Measurement Comparative Analysis Using Core and Nuclear Methods. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 66, p. 379-406, 1997.

SENÇO, W., Manual de Técnicas de Pavimentação - Vol-II, 1ed, São Paulo, PINE, 2001.

USACE (2000) Hot-Mix Asphalt Paving. Handbook,. American Association of State Highway and Transportation Officials, Federal Aviation Administration, Federal Highway Administration, National Asphalt Pavement Association, US Army Corps of Engineers, American Public Works Association, National Association of County Engineers. USA, 2000.

VASCONCELOS, K. L., Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias. Dissertação de Mestrado, PETRAN/UFC, Fortaleza, CE, 2004.

ZANIEWSKI, J. P. & NELSON, J., Comparison Of 95 mm Superpave Andmarshall Wearing I Mixes in West Virginia, Department of Civil and Environmental Engineering Morgantown, West Virginia June, 2003.

ZHANG, J.; COOLEY JR, L. A.; HURLEY, G.; PARKER, F., Effect of Superpave Defined Restricted Zone on Hot Mix Asphalt Performance. 83th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, 2004.

ANEXOS

Anexo A – Dosagem Marshall

Constam planilhas de cálculos e resultantes dos experimentos realizados para o ensaio Marshall para a dosagem do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) das misturas estudadas.

Anexo B – Ensaio Marshall

Constam as Planilhas do ensaio Marshall das misturas no teor de projeto.

Anexo C – Ensaio Resistência à Tração por Compressão diametral (Com auxílio do pórtico de Lottman)

Constam planilhas de cálculos com resultantes dos experimentos realizados com o auxílio do pórtico de *Lottman*.

Anexo D – Ensaio de resistência ao Dano pela Umidade Induzida – Ensaio de Lotman

Constam planilhas de cálculos e resultantes do ensaio.

Anexo E – Ensaio de Módulo Resiliência

Constam da planilha de cálculo com resultados dos ensaios com

Anexo F – Equivalente areia dos agregados miúdos e adesividade do agregado graúdo

Constam os resultantes dos ensaios de equivalente areia e da adesividade do agregado graúdo.

7.1- ANEXO A

7.1.1 Dosagem Marshall

Constam planilhas de cálculos, resultantes dos experimentos realizados para o ensaio Marshall para a dosagem do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) Das misturas em estudo. A dosagem constituiu de determinar o teor de projeto de CAP para três mistura

Quadro.1 – Ensaio Marshall [MISTURA 01]

| DOSAGEM "MARSHALL" 75 Golpes | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------|-------------------|--------|--------|---------|-----------------|-----------------|-------|----------------|-------|------------|------------|------------------|---------------------------|----------|-----------|----------|
| DISSERTAÇÃO DE MESTRADO : DANILO FERNANDES DE MEDEIROS | | | | | | | | | | | | | | | FAIXA 2 | | |
| INFRAERO TRAÇO : Brita 25 mm , Brita 19 mm, Pedrisco 3/8", Pó-de-Pedra, A cal | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CORPO DE PROVA - Nº | % DE LIGANTE NA MISTURA | | ALTURA | PESO | | VOLUME | PESO ESPECIFICO | | VAZIOS MISTURA | | VAZIOS - % | | | ESTABILIDADE | | | FLUÊNCIA |
| | a | b | | NO AR | NA ÁGUA | | APAR. | TEÓR. | VAZIOS | | AGREG. | | REL. BET. VAZIOS | LIDA | CORREÇÃO | CORREGIDA | |
| | POR PESO DE AGREG. | POR PESO DE MIST. | mm | g | g | cm ³ | d/f | - | V(%) | VAM | VCB | RBV= m / l | Kg | 927,23xh ^{-1,64} | Kg | mm | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | 4,00 | 66,70 | 1188,1 | 665,5 | 522,6 | 2,273 | 2,496 | 8,92 | 17,83 | 8,91 | 49,97 | 972,00 | 0,95 | 1.820,42 | 0 | |
| 3 | | 4,00 | 66,30 | 1177,7 | 681,4 | 496,3 | 2,373 | 2,496 | 4,93 | 14,23 | 9,30 | 65,34 | 893,00 | 0,95 | 1.689,05 | 0 | |
| M | | 4,00 | | | | | 2,323 | 2,496 | 6,93 | 16,03 | 9,10 | 57,65 | 932,50 | 0,95 | 1.754,73 | 0,00 | |
| 4 | | 4,50 | 66,20 | 1185,6 | 672,8 | 512,8 | 2,312 | 2,477 | 6,68 | 16,87 | 10,19 | 60,41 | 890,00 | 0,96 | 1.687,54 | 0 | |
| 5 | | 4,50 | 64,60 | 1185,8 | 681 | 504,8 | 2,349 | 2,477 | 5,18 | 15,54 | 10,35 | 66,64 | 934,00 | 1,00 | 1.843,48 | 0 | |
| 6 | | 4,50 | 64,40 | 1193 | 682,1 | 510,9 | 2,335 | 2,477 | 5,75 | 16,04 | 10,29 | 64,18 | 913,00 | 1,00 | 1.811,21 | 0 | |
| M | | 4,50 | | | | | 2,332 | 2,477 | 5,87 | 16,15 | 10,28 | 63,74 | | | 1.780,74 | 0,00 | |
| 7 | | 5,00 | 63,60 | 1187,9 | 684,4 | 503,5 | 2,359 | 2,459 | 4,06 | 15,61 | 11,55 | 74,01 | 986,00 | 1,02 | 1.996,55 | 0 | |
| 9 | | 5,00 | 62,60 | 1175,5 | 680,7 | 494,8 | 2,376 | 2,459 | 3,39 | 15,02 | 11,63 | 77,44 | 1016,00 | 1,05 | 2.111,46 | 0 | |
| M | | 5,00 | | | | | 2,367 | 2,459 | 3,72 | 15,32 | 11,59 | 75,72 | | | 2.054,00 | 0,00 | |
| 10 | | 5,50 | 64,40 | 1178,2 | 678,4 | 499,8 | 2,357 | 2,426 | 2,82 | 15,52 | 12,70 | 81,84 | 757,00 | 1,00 | 1.501,74 | 0 | |
| 11 | | 5,50 | 64,40 | 1185,9 | 684,1 | 501,8 | 2,363 | 2,426 | 2,57 | 15,30 | 12,73 | 83,19 | 704,00 | 1,00 | 1.396,60 | 0 | |
| 12 | | 5,50 | 62,90 | 1184,1 | 690 | 494,1 | 2,396 | 2,426 | 1,20 | 14,11 | 12,91 | 91,47 | 1137,00 | 1,04 | 2.344,47 | 0 | |
| M | | 5,50 | | | | | 2,360 | 2,426 | 2,69 | 15,41 | 12,71 | 82,52 | | | 1.449,17 | 0,00 | |
| 13 | | 6,00 | 64,00 | 1179,9 | 675,1 | 504,8 | 2,337 | 2,408 | 2,94 | 16,67 | 13,74 | 82,37 | 722,00 | 1,01 | 1.447,02 | 0,00 | |
| 14 | | 6,00 | 63,80 | 1190,4 | 690,4 | 500,0 | 2,381 | 2,408 | 1,14 | 15,13 | 13,99 | 92,49 | 728,00 | 1,02 | 1.466,55 | 0,00 | |
| 15 | | 6,00 | 63,50 | 1190,8 | 690,2 | 500,6 | 2,379 | 2,408 | 1,22 | 15,20 | 13,98 | 91,97 | 685,00 | 1,02 | 1.390,64 | 0,00 | |
| M | | 6,00 | | | | | 2,359 | 2,408 | 2,04 | 15,90 | 13,86 | 87,43 | | | 1.456,79 | 0,00 | |

Quadro 2 – Ensaio Marshall [MISTURA 02]

DOSAGEM "MARSHALL" 75 Golpes

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO : DANILO FERNANDES DE MEDEIROS

FAIXA 2 INFRAERO TRAÇO : Brita 19 mm : Pedrisco 3/8" : Pó-de-Pedra : Areia de Campo : A cal - 10 : 20 :35 : 30 : 5 -

| CORPO DE PROVA - Nº | % DE LIGANTE NA MISTURA | | ALTURA | PESO | | VOLUME | PESO ESPECIFICO | | VAZIOS MISTURA | VAZIOS - % | | | ESTABILIDADE | | | FLUÊNCIA |
|---------------------|-------------------------|-------------------|--------|--------|---------|-----------------|-----------------|--------------|----------------|--------------|--------------|------------------|--------------|---------------------------|-----------------|-------------|
| | a | b | | NO AR | NA ÁGUA | | APAR. | TEÓR. | VAZIOS | AGREG. | | REL. BET. VAZIOS | LIDA | CORREÇÃO | CORREGIDA | |
| | POR PESO DE AGREG. | POR PESO DE MIST. | mm | g | g | cm ³ | d/f | - | V(%) | VAM | VCB | RBV= m / l | Kg | 927,23xh ^{-1,64} | Kg | mm |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | 4,00 | 69,10 | 1188,4 | 638,8 | 549,6 | 2,162 | 2,486 | 13,02 | 21,45 | 8,44 | 39,33 | 647,00 | 0,89 | 1.143,49 | 0 |
| 2 | | 4,00 | 68,30 | 1188,9 | 645,3 | 543,6 | 2,187 | 2,486 | 12,02 | 20,55 | 8,53 | 41,52 | 847,00 | 0,91 | 1.525,83 | |
| 3 | | 4,00 | 68,30 | 1185,6 | 639,3 | 546,3 | 2,170 | 2,486 | 12,70 | 21,16 | 8,47 | 40,01 | 764,00 | 0,91 | 1.376,31 | 0 |
| M | | 4,00 | | | | | 2,173 | 2,486 | 12,58 | 21,06 | 8,48 | 40,28 | | | 1.348,54 | 0,00 |
| 4 | | 4,50 | 67,80 | 1182,2 | 641,5 | 540,7 | 2,186 | 2,468 | 11,39 | 20,99 | 9,60 | 45,72 | 824,00 | 0,92 | 1.502,39 | 0 |
| 5 | | 4,50 | 68,10 | 1187 | 651,7 | 535,3 | 2,217 | 2,468 | 10,14 | 19,87 | 9,73 | 48,99 | 813,00 | 0,91 | 1.471,64 | 0 |
| 6 | | 4,50 | 67,10 | 1182,1 | 649,29 | 532,8 | 2,219 | 2,468 | 10,09 | 19,83 | 9,74 | 49,12 | 1032,00 | 0,94 | 1.913,93 | 0 |
| M | | 4,50 | | | | | 2,207 | 2,468 | 10,54 | 20,23 | 9,69 | 47,94 | | | 1.629,32 | 0,00 |
| 7 | | 5,00 | 67,30 | 1181,2 | 650,9 | 530,3 | 2,227 | 2,450 | 9,07 | 19,93 | 10,86 | 54,51 | 766,00 | 0,93 | 1.413,70 | 0 |
| 8 | | 5,00 | 66,10 | 1182,9 | 654 | 528,9 | 2,237 | 2,450 | 8,69 | 19,60 | 10,91 | 55,64 | 573,00 | 0,96 | 1.089,17 | 0 |
| 9 | | 5,00 | 66,70 | 1187,4 | 656,9 | 530,5 | 2,238 | 2,450 | 8,62 | 19,54 | 10,92 | 55,87 | 505,00 | 0,95 | 945,79 | 0 |
| M | | 5,00 | | | | | 2,234 | 2,450 | 8,80 | 19,69 | 10,90 | 55,34 | | | 1.149,55 | 0,00 |
| 10 | | 5,50 | 65,00 | 1158,1 | 643 | 515,1 | 2,248 | 2,432 | 7,54 | 19,60 | 12,06 | 61,52 | 427,00 | 0,99 | 834,30 | 0 |
| 11 | | 5,50 | 66,60 | 1180,7 | 653,5 | 527,2 | 2,240 | 2,432 | 7,90 | 19,92 | 12,01 | 60,32 | 385,00 | 0,95 | 722,83 | 0 |
| 12 | | 5,50 | 66,60 | 1189,9 | 663,1 | 526,8 | 2,259 | 2,432 | 7,11 | 19,23 | 12,12 | 63,01 | 535,00 | 0,95 | 1.004,45 | 0 |
| M | | 5,50 | | | | | 2,249 | 2,432 | 7,52 | 19,58 | 12,06 | 61,62 | | | 853,86 | 0,00 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--|------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|--------|------|----------|------|
| 13 | | 6,00 | 65,50 | 1188,2 | 669,8 | 518,4 | 2,292 | 2,414 | 5,06 | 18,47 | 13,41 | 72,61 | 476,00 | 0,97 | 918,42 | 3,98 |
| 14 | | 6,00 | 56,90 | 1033,4 | 580,9 | 452,5 | 2,284 | 2,414 | 5,40 | 18,77 | 13,37 | 71,21 | 430,00 | 1,23 | 1.045,10 | 3,70 |
| 15 | | 6,00 | 61,00 | 1091,7 | 609,7 | 482,0 | 2,265 | 2,414 | 6,18 | 19,44 | 13,26 | 68,19 | 368,00 | 1,09 | 797,96 | 3,98 |
| M | | 6,00 | | | | | 2,280 | 2,414 | 5,55 | 18,89 | 13,35 | 70,67 | | | 920,49 | 3,89 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | 6,50 | 64,80 | 1189,1 | 670,4 | 518,7 | 2,292 | 2,397 | 4,36 | 18,89 | 14,53 | 76,93 | 332,00 | 0,99 | 651,97 | 3,98 |
| 14 | | 6,50 | 64,50 | 1191,10 | 676,3 | 514,8 | 2,314 | 2,397 | 3,47 | 18,14 | 14,67 | 80,86 | 387,00 | 1,00 | 765,78 | 3,70 |
| 15 | | 6,50 | 64,90 | 1187,80 | 674,7 | 513,1 | 2,315 | 2,397 | 3,42 | 18,10 | 14,68 | 81,10 | 320,00 | 0,99 | 626,82 | 3,98 |
| M | | 6,50 | | | | | 2,307 | 2,397 | 3,75 | 18,38 | 14,63 | 79,63 | | | 681,52 | 3,89 |

Quadro 3 – Ensaio Marshall [MISTURA 03]

| DOSAGEM "MARSHALL" 75 Golpes | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------|-------------------|--------|--------|---------|--------|-----------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|---------|------------------|-----------------|-------------|---------------------------|----------|----|
| DISSERTAÇÃO DE MESTRADO : DANILO FERNANDES DE MEDEIROS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FAIXA 2 INFRAERO TRAÇO : Brita 25 mm : Pedrisco 3/8" : Pó-de-Pedra : A cal - 38 : 37 : 20 : 5 - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CORPO DE PROVA - Nº | % DE LIGANTE NA MISTURA | | ALTURA | PESO | | VOLUME | PESO ESPECIFICO | | VAZIOS MISTURA | | | VAZIOS - % | | | ESTABILIDADE | | | FLUÊNCIA | |
| | a | b | | NO AR | NA ÁGUA | | APAR. | TEÓR. | VAZIOS | | | AGREG. | | REL. BET. VAZIOS | LIDA | CORREÇÃO | CORREGIDA | | |
| | POR PESO DE AGREG. | POR PESO DE MIST. | mm | g | g | cm³ | d/f | - | V (%) | | | VAM | VCB | RBV= m / l | | Kg | 927,23xh ^{-1,64} | Kg | mm |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | 4,00 | 64,50 | 1182,2 | 685,5 | 496,7 | 2,380 | 2,502 | 4,85 | 14,14 | 9,29 | 65,68 | 1004,00 | 1,00 | 1,986,68 | 0 | | | |
| 2 | | 4,00 | 64,40 | 1183,4 | 673,3 | 510,1 | 2,320 | 2,502 | 7,26 | 16,31 | 9,05 | 55,50 | 1065,00 | 1,00 | 2.112,75 | | | | |
| 3 | | 4,00 | 64,40 | 1186,2 | 689,1 | 497,1 | 2,386 | 2,502 | 4,61 | 13,92 | 9,31 | 66,89 | 1046,00 | 1,00 | 2.075,06 | 0 | | | |
| M | | 4,00 | | | | | 2,362 | 2,502 | 5,57 | 14,79 | 9,22 | 62,69 | | | 2.058,16 | 0,00 | | | |
| 4 | | 4,50 | 64,10 | 1157,6 | 673,9 | 483,7 | 2,393 | 2,483 | 3,61 | 14,12 | 10,50 | 74,42 | 1150,00 | 1,01 | 2.298,91 | 0 | | | |
| 5 | | 4,50 | 64,00 | 1190,2 | 695,6 | 494,6 | 2,406 | 2,483 | 3,08 | 13,64 | 10,56 | 77,42 | 798,00 | 1,01 | 1.599,34 | 0 | | | |
| 6 | | 4,50 | 64,10 | 1191,6 | 694,2 | 497,4 | 2,396 | 2,483 | 3,51 | 14,03 | 10,52 | 74,96 | 764,00 | 1,01 | 1.527,28 | 0 | | | |
| M | | 4,50 | | | | | 2,398 | 2,483 | 3,40 | 13,93 | 10,53 | 75,60 | | | 1.808,51 | 0,00 | | | |
| 7 | | 5,00 | 64,00 | 1185,3 | 688,3 | 497,0 | 2,385 | 2,465 | 3,23 | 14,86 | 11,63 | 78,26 | 660,00 | 1,01 | 1.322,76 | 0 | | | |
| 8 | | 5,00 | 63,90 | 1157,6 | 674,5 | 483,1 | 2,396 | 2,465 | 2,77 | 14,46 | 11,69 | 80,82 | 615,00 | 1,01 | 1.235,74 | 0 | | | |
| 9 | | 5,00 | 64,10 | 1189,3 | 693,2 | 496,1 | 2,397 | 2,465 | 2,73 | 14,42 | 11,69 | 81,08 | 891,00 | 1,01 | 1.781,16 | 0 | | | |
| M | | 5,00 | | | | | 2,393 | 2,465 | 2,91 | 14,58 | 11,67 | 80,05 | | | 1.446,55 | 0,00 | | | |
| 10 | | 5,50 | 64,10 | 1185,2 | 688,6 | 496,6 | 2,387 | 2,446 | 2,45 | 15,25 | 12,80 | 83,96 | 590,00 | 1,01 | 1.179,44 | 0 | | | |
| 11 | | 5,50 | 64,20 | 1179,7 | 683 | 496,7 | 2,375 | 2,446 | 2,92 | 15,66 | 12,74 | 81,37 | 540,00 | 1,01 | 1.076,73 | 0 | | | |
| 12 | | 5,50 | 64,40 | 1176,7 | 686,6 | 490,1 | 2,401 | 2,446 | 1,86 | 14,74 | 12,88 | 87,38 | 590,00 | 1,00 | 1.170,45 | 0 | | | |
| M | | 5,50 | | | | | 2,388 | 2,446 | 2,41 | 15,22 | 12,81 | 84,23 | | | 1.142,21 | 0,00 | | | |
| 13 | | 6,00 | 63,80 | 1185,8 | 687,8 | 498,0 | 2,381 | 2,429 | 1,96 | 15,89 | 13,94 | 87,69 | 603,00 | 1,02 | 1.214,74 | 3,98 | | | |
| 14 | | 6,00 | 63,80 | 1178,9 | 684,9 | 494,0 | 2,386 | 2,429 | 1,74 | 15,70 | 13,97 | 88,93 | 598,00 | 1,02 | 1.204,67 | 3,70 | | | |
| 15 | | 6,00 | 63,90 | 1181,4 | 685,5 | 495,9 | 2,382 | 2,429 | 1,91 | 15,85 | 13,94 | 87,97 | 543,00 | 1,01 | 1.091,06 | 3,98 | | | |
| M | | 6,00 | | | | | 2,383 | 2,429 | 1,87 | 15,82 | 13,95 | 88,20 | | | 1.170,16 | 3,89 | | | |

7.2 Anexo B

7.2.1 Ensaio Marshall

Constam planilhas de cálculos referente aos resultados dos experimentos realizados das misturas no teor de projeto estabelecido na dosagem Marshall

Quadro 4–Verificação das características volumétricas e estabilidade Marshall no teor de projeto da Mistura 1[Teor de Projeto 4,9%]

| DOSAGEM "MARSHALL" 75 Golpes | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------|-------------------|--------|--------|---------|-----------------|-----------------|-------|----------------|--------------|-------|------------------|--------------|---------------------------|-----------------|----------|
| DISSERTAÇÃO DE MESTRADO : DANILO FERNANDES DE MEDEIROS | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FAIXA 2 INFRAERO TRAÇO : Brita 25 mm , Brita 19 mm, Pedrisco 3/8", Pó-de-Pedra, A cal - 15 : 18 : 22 : 40 : 5 - | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CORPO DE PROVA - Nº | % DE LIGANTE NA MISTURA | | ALTURA | PESO | | VOLUME | PESO ESPECIFICO | | VAZIOS MISTURA | VAZIOS - % | | | ESTABILIDADE | | | FLUÊNCIA |
| | a | b | | NO AR | NA ÁGUA | | APAR. | TEÓR. | VAZIOS | AGREG. | | REL. BET. VAZIOS | LIDA | CORREÇÃO | CORREGIDA | |
| | POR PESO DE AGREG. | POR PESO DE MIST. | mm | g | g | cm ³ | d/f | - | V(%) | VAM | VCB | RBV= m / l | Kg | 927,23xh ^{-1,64} | Kg | mm |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | 4,90 | 65,39 | 1189,3 | 684,2 | 505,1 | 2,355 | 2,464 | 4,44 | 15,69 | 11,25 | 71,72 | 825,00 | 0,98 | 1.596,20 | 11,9 |
| 2 | | 4,90 | 65,23 | 1188,9 | 684,5 | 504,4 | 2,357 | 2,464 | 4,34 | 15,60 | 11,27 | 72,21 | 816,00 | 0,98 | 1.585,14 | 12,5 |
| 3 | | 4,90 | 65,25 | 1189,1 | 686 | 503,1 | 2,364 | 2,464 | 4,07 | 15,37 | 11,30 | 73,50 | 823,00 | 0,98 | 1.597,94 | 9,5 |
| M | | 4,90 | | | | | 2,358 | 2,464 | 4,20 | 15,55 | 11,27 | 72,48 | | | 1.593,09 | 11,00 |

Quadro 5 – Verificação das características volumétricas e estabilidade Marshall no teor de projeto da Mistura 2 [Teor de Projeto 6,4%]

| DOSAGEM "MARSHALL" 75 Golpes | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------|-------------------|--------|--------|---------|-----------------|-----------------|--------------|----------------|--------------|--------------|------------------|--------------|---------------------------|-----------------|--------------|
| DISSERTAÇÃO DE MESTRADO : DANILO FERNANDES DE MEDEIROS | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FAIXA 2 INFRAERO TRAÇO : Brita 19 mm : Pedrisco 3/8": Pó-de-Pedra : Areia de Campo : A cal - 10 : 20 : 35 : 30 : 5 - | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CORPO DE PROVA - N ^o | % DE LIGANTE NA MISTURA | | ALTURA | PESO | | VOLUME | PESO ESPECIFICO | | VAZIOS MISTURA | VAZIOS - % | | | ESTABILIDADE | | | FLUÊNCIA |
| | a | b | | NO AR | NA ÁGUA | | APAR. | TEÓR. | VAZIOS | AGREG. | | REL. BET. VAZIOS | LIDA | CORREÇÃO | CORREGIDA | |
| | POR PESO DE AGREG. | POR PESO DE MIST. | mm | g | g | cm ³ | d/f | - | V(%) | VAM | VCB | RBV= m / l | Kg | 927,23xh ^{-1,64} | Kg | mm |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | 6,40 | 64,57 | 1185,7 | 671,2 | 514,5 | 2,305 | 2,403 | 4,08 | 18,46 | 14,39 | 77,91 | 575,00 | 1,00 | 1.135,77 | 11 |
| 2 | | 6,40 | 64,83 | 1188,5 | 673,5 | 515,0 | 2,308 | 2,403 | 3,94 | 18,35 | 14,41 | 78,50 | 525,00 | 0,99 | 1.030,19 | 9,5 |
| 3 | | 6,40 | 64,45 | 1183,9 | 669,7 | 514,2 | 2,302 | 2,403 | 4,17 | 18,54 | 14,37 | 77,52 | 535,00 | 1,00 | 1.059,99 | 10,5 |
| M | | 6,40 | | | | | 2,305 | 2,403 | 4,06 | 18,45 | 14,39 | 77,98 | | | 1.075,32 | 10,00 |

Quadro 6 –Verificação das características volumétricas e estabilidade Marshall no teor de projeto da Mistura 3[Teor de Projeto 4,4%]

| DOSAGEM "MARSHALL" 75 Golpes | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------|-------------------|--------|--------|---------|-----------------|-----------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|------------------|---------------------------|-----------------|-------------|
| DISSERTAÇÃO DE MESTRADO : DANILO FERNANDES DE MEDEIROS | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FAIXA 2 INFRAERO TRAÇO : Brita 25 mm : Pedrisco 3/8" : Pó-de-Pedra : A cal - 38 : 37 : 20 : 5 - | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CORPO DE PROVA - Nº | % DE LIGANTE NA MISTURA | | ALTURA | PESO | | VOLUME | PESO ESPECIFICO | | VAZIOS MISTURA | VAZIOS - % | | | ESTABILIDADE | | | FLUÊNCIA |
| | a | b | | NO AR | NA ÁGUA | | APAR. | TEÓR. | | VAZIOS | AGREG. | | REL. BET. VAZIOS | LIDA | CORREÇÃO | |
| | POR PESO DE AGREG. | POR PESO DE MIST. | mm | g | g | cm ³ | d/f | - | V(%) | VAM | VCB | RBV= m / l | Kg | 927,23xh ^{-1,64} | Kgf | mm |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | 4,40 | 64,22 | 1182,4 | 689 | 493,4 | 2,396 | 2,487 | 3,63 | 13,91 | 10,29 | 73,94 | 823,00 | 1,01 | 1.640,18 | 6,5 |
| 2 | | 4,40 | 64,22 | 1177,5 | 685,6 | 491,9 | 2,394 | 2,487 | 3,73 | 14,01 | 10,27 | 73,35 | 834,00 | 1,01 | 1.662,11 | 9 |
| 3 | | 4,40 | 65,17 | 1183,6 | 686,5 | 497,1 | 2,381 | 2,487 | 4,25 | 14,46 | 10,22 | 70,65 | 825,00 | 0,98 | 1.605,05 | 8,3 |
| M | | 4,40 | | | | | 2,390 | 2,487 | 3,87 | 14,13 | 10,26 | 72,64 | | | 1.635,78 | 7,93 |

7.3 -Anexo C

7.3.1 Ensaio Resistência à Tração por Compressão diametral

Constam planilhas de cálculos referente aos resultados experimentais realizados nas misturas no teor de projeto com o auxílio do pórtico de Lotman

Quadro 7 – Determinação da Resistência à tração por compressão Diametral das Misturas [Teor de Projeto]

| DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - RT - DNER-ME138-94 | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|------------------|-----------|----------|------|------|
| % de Ligante na Mistura | Corpo de Prova | Diâmetros (cm) | | | | Altura (cm) | | | | Carga de Ruptura | | | RT | |
| | | D ₁ | D ₂ | D ₃ | D _{Médio} | h ₁ | h ₂ | h ₃ | H _{Médio} | Lida | Corrigida | Newtons | MPa | MPa |
| FAIXA 2 INFRAERO TRAÇO : Brita 25 mm , Brita 19 mm, Pedrisco 3/8", Pó-de-Pedra, A cal - 15 : 18 : 22 : 40 : 5 MISTURA 01 INTERMEDIÁRIA DA FAIXA | | | | | | | | | | | | | | |
| 4,9 | 1 | 10,05 | 10,14 | 10,09 | 10,09 | 6,31 | 6,365 | 6,3 | 6,33 | 375 | 742,875 | 7287,604 | 0,73 | 0,83 |
| 4,9 | 2 | 10,15 | 10,15 | 10,14 | 10,15 | 6,36 | 6,38 | 6,42 | 6,39 | 455 | 901,355 | 8842,293 | 0,87 | |
| 4,9 | 3 | 10,11 | 10,095 | 10,05 | 10,09 | 6,34 | 6,3 | 6,33 | 6,32 | 460 | 911,26 | 8939,461 | 0,89 | |
| FAIXA 2 INFRAERO TRAÇO : Brita 19 mm : Pedrisco 3/8" : Pó-de-Pedra : Areia de Campo : A cal - 10 : 20 : 35 : 30 : 5 - MISTURA 02 LIMITE SUPERIOR DA FAIXA 2 | | | | | | | | | | | | | | |
| 6,4 | 1 | 10,16 | 10,16 | 10,16 | 10,16 | 6,41 | 6,415 | 6,39 | 6,41 | 332 | 657,692 | 6451,959 | 0,63 | 0,63 |
| 6,4 | 2 | 10,16 | 10,16 | 10,16 | 10,16 | 5,98 | 5,99 | 5,83 | 5,93 | 293 | 580,433 | 5694,048 | 0,60 | |
| 6,4 | 3 | 10,12 | 10,09 | 10,09 | 10,10 | 6,31 | 6,31 | 6,305 | 6,31 | 335 | 663,635 | 6510,259 | 0,65 | |
| FAIXA 2 INFRAERO TRAÇO : Brita 25 mm : Pedrisco 3/8" : Pó-de-Pedra : A cal - 38 : 37 : 20 : 5 - MISTURA 03 LIMITE INFERIOR DA FAIXA | | | | | | | | | | | | | | |
| 4,4 | 1 | 11,5 | 11,9 | 11,5 | 11,63 | 6,58 | 6,6 | 6,5 | 6,56 | 560 | 1109,36 | 10882,82 | 0,91 | 0,96 |
| 4,4 | 2 | 10,6 | 11,1 | 11,2 | 10,97 | 6,65 | 6,69 | 6,65 | 6,66 | 647 | 1281,707 | 12573,55 | 1,10 | |
| 4,4 | 3 | 11,5 | 11,6 | 11,5 | 11,53 | 6,56 | 6,55 | 6,58 | 6,56 | 544 | 1077,664 | 10571,88 | 0,89 | |

7.4 -Anexo D

7.4.1 Ensaio de resistência ao Dano pela Umidade Induzida – Ensaio de Lotman

Constam planilhas de cálculos referente aos resultados experimentais realizados nas misturas no teor de projeto com o auxílio do pórtico de Lotman com e sem um condicionamento prévio ,

Quadro 8 – Ensaio com o auxílio do pórtico de Lotman sem condicionamento V= 6,5% [Misturas Estudadas]

| DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - RT - SEM CONDICIONAMENTO | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|------------------|-----------|----------|------|------|
| % de Ligante na Mistura | Corpo de Prova | Diâmetros (cm) | | | | Altura (cm) | | | | Carga de Ruptura | | | RT | |
| | | D ₁ | D ₂ | D ₃ | D _{Médio} | h ₁ | h ₂ | h ₃ | H _{Médio} | Lida | Corrigida | Newtons | MPa | MPa |
| FAIXA 2 INFRAERO TRAÇO : Brita 25 mm , Brita 19 mm, Pedrisco 3/8", Pó-de-Pedra, A cal - 15 : 18 : 22 : 40 : 5 MISTURA 01 INTERMEDIÁRIA DA FAIXA | | | | | | | | | | | | | | |
| 4,9 | 4 | 10,14 | 10,14 | 10,13 | 10,14 | 6,8 | 6,78 | 6,75 | 6,78 | 355 | 703,255 | 6898,932 | 0,64 | 0,62 |
| 4,9 | 5 | 10,16 | 10,15 | 10,095 | 10,14 | 6,59 | 6,66 | 6,64 | 6,63 | 360 | 713,16 | 6996,1 | 0,66 | |
| 4,9 | 6 | 10,135 | 10,17 | 10,13 | 10,15 | 6,75 | 6,71 | 6,77 | 6,74 | 315 | 624,015 | 6121,587 | 0,57 | |
| COM 7% DE VAZIOS | | | | | | | | | | | | | | |
| FAIXA 2 INFRAERO TRAÇO : Brita 19 mm : Pedrisco 3/8" : Pó-de-Pedra : Areia de Campo : A cal - 10 : 20 : 35 : 30 : 5 - MISTURA 02 LIMITE SUPERIOR DA FAIXA 2 | | | | | | | | | | | | | | |
| 6,4 | 4 | 10,14 | 10,18 | 10,08 | 10,13 | 6,48 | 6,45 | 6,44 | 6,46 | 332 | 657,692 | 6451,959 | 0,63 | 0,63 |
| 6,4 | 5 | 10,11 | 10,05 | 10,17 | 10,11 | 6,54 | 6,53 | 6,53 | 6,53 | 332 | 657,692 | 6451,959 | 0,62 | |
| 6,4 | 6 | 10,2 | 10,2 | 10,2 | 10,20 | 6,43 | 6,47 | 6,51 | 6,47 | 337 | 667,597 | 6549,127 | 0,63 | |
| COM 7% DE VAZIOS | | | | | | | | | | | | | | |
| FAIXA 2 INFRAERO TRAÇO : Brita 25 mm : Pedrisco 3/8" : Pó-de-Pedra : A cal - 38 : 37 : 20 : 5 - MISTURA 03 LIMITE INFERIOR DA FAIXA | | | | | | | | | | | | | | |
| 4,4 | 4 | 10,075 | 10,13 | 10,13 | 10,11 | 7,2 | 7,2 | 7,22 | 7,21 | 285 | 564,585 | 5538,579 | 0,48 | 0,48 |
| 4,4 | 5 | 10,14 | 10,11 | 10,12 | 10,12 | 7,08 | 7,16 | 7,16 | 7,13 | 278 | 550,718 | 5402,544 | 0,48 | |
| 4,4 | 6 | 10,13 | 10,15 | 10,06 | 10,11 | 6,89 | 6,91 | 6,88 | 6,89 | 265 | 524,965 | 5149,907 | 0,47 | |

Quadro 9 – Ensaio com o auxílio do pórtico de Lotman com condicionamento [Misturas Estudadas]

| DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - RRT - SEM CONDICIONAMENTO | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|------------------|-----------|----------|------|------|
| % de Ligante na Mistura | Corpo de Prova | Diâmetros (cm) | | | | Altura (cm) | | | | Carga de Ruptura | | | RT | |
| | | D ₁ | D ₂ | D ₃ | D _{Médio} | h ₁ | h ₂ | h ₃ | H _{Médio} | Lida | Corrigida | Newtons | MPa | MPa |
| FAIXA 2 DA INFRAERO TRAÇO : Brita 25 mm , Brita 19 mm, Pedrisco 3/8", Pó-de-Pedra, A cal - 15 : 18 : 22 : 40 : 5 MISTURA 01 INTERMEDIÁRIA DA FAIXA | | | | | | | | | | | | | | |
| 4,9 | 4 | 10,24 | 10,16 | 10,155 | 10,19 | 6,745 | 6,79 | 6,79 | 6,78 | 275 | 544,775 | 5344,243 | 0,49 | 0,52 |
| 4,9 | 5 | 10,09 | 10,15 | 10,15 | 10,13 | 6,785 | 6,79 | 6,77 | 6,78 | 268 | 530,908 | 5208,207 | 0,48 | |
| 4,9 | 6 | 10,09 | 10,12 | 10,14 | 10,12 | 6,69 | 6,66 | 6,68 | 6,68 | 315 | 624,015 | 6121,587 | 0,58 | |
| COM 7% DE VAZIOS | | | | | | | | | | | | | | |
| FAIXA 2 INFRAERO TRAÇO : Brita 19 mm : Pedrisco 3/8" : Pó-de-Pedra : Areia de Campo : A cal - 10 : 20 :35 : 30 : 5 - MISTURA 02 LIMITE SUPERIOR DA FAIXA 2 | | | | | | | | | | | | | | |
| 6,4 | 4 | 10,14 | 10,16 | 10,13 | 10,14 | 6,44 | 6,53 | 6,465 | 6,48 | 255 | 505,155 | 4955,571 | 0,48 | 0,42 |
| 6,4 | 5 | 10,16 | 10,15 | 10,16 | 10,16 | 6,53 | 6,55 | 6,53 | 6,54 | 210 | 416,01 | 4081,058 | 0,39 | |
| 6,4 | 6 | 10,16 | 10,11 | 10,16 | 10,14 | 6,49 | 6,55 | 6,53 | 6,52 | 213 | 421,953 | 4139,359 | 0,40 | |
| COM 7% DE VAZIOS | | | | | | | | | | | | | | |
| FAIXA 2 INFRAERO TRAÇO : Brita 25 mm : Pedrisco 3/8" : Pó-de-Pedra : A cal - 38 : 37 : 20 : 5 - MISTURA 03 LIMITE INFERIOR DA FAIXA | | | | | | | | | | | | | | |
| 4,4 | 4 | 10,05 | 10,15 | 10,15 | 10,12 | 6,9 | 6,83 | 6,88 | 6,87 | 235 | 465,535 | 4566,898 | 0,42 | 0,44 |
| 4,4 | 5 | 10,11 | 10,2 | 10,16 | 10,16 | 6,88 | 6,9 | 6,89 | 6,89 | 269 | 532,889 | 5227,641 | 0,48 | |
| 4,4 | 6 | 10,13 | 10,14 | 10,155 | 10,14 | 6,95 | 6,94 | 6,96 | 6,95 | 245 | 485,345 | 4761,234 | 0,43 | |

7.5 -Anexo E

7.5.1 Ensaio de Módulo Resiliência

Constam planilhas de cálculos referente aos resultados experimentais realizados nas misturas no teor de projeto no SIEMBS ,

Quadro 10 – Ensaio de Módulo de Resiliência [Misturas no teor de Projeto

Dissertação de mestrado de Danilo - UFCG

| Mistura | Corpo de prova | Altura do Corpo de prova | | | | Diâmetro do corpo de prova | | | MR (MPa) | | | MR _{méd} (MPa) | T (°C) |
|-------------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------|--------------------|----------------------------|----------------|--------------------|----------|---------|---------|-------------------------|-----------|
| | | h ₁ | h ₂ | h ₃ | h _{médio} | D ₁ | D ₂ | D _{médio} | 1ª FASE | 2ª FASE | 3ª FASE | | |
| MISTURA 01 | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 11 | 64,50 | 64,40 | 64,35 | 64,42 | 101,10 | 101,40 | 101,25 | 3526,91 | 3540,00 | 3502,96 | 3523,29 | 30 |
| | 12 | 66,30 | 65,90 | 66,30 | 66,17 | 101,60 | 101,60 | 101,60 | 3289,52 | 3376,52 | 3354,41 | 3340,15 | 30 |
| | 13 | 64,50 | 64,70 | 64,60 | 64,60 | 101,60 | 101,60 | 101,60 | 2555,28 | 2606,95 | 2682,48 | 2614,90 | 30 |
| | 14 | 64,60 | 64,80 | 64,50 | 64,63 | 101,40 | 101,60 | 101,50 | 3303,84 | 3403,19 | 3317,91 | 3341,65 | 30 |
| MISTURA 02 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 21 | 66,66 | 66,50 | 66,60 | 66,59 | 101,40 | 101,30 | 101,35 | 2962,54 | 2976,70 | 2979,75 | 2973,00 | 30 |
| | 22 | 66,80 | 66,90 | 67,00 | 66,90 | 101,30 | 101,50 | 101,40 | 3103,95 | 3179,81 | 3175,79 | 3153,18 | 30 |
| | 23 | 67,00 | 67,60 | 67,10 | 67,23 | 101,50 | 101,40 | 101,45 | 4050,44 | 3987,56 | 3956,71 | 3998,24 | 30 |
| | 24 | 66,60 | 66,50 | 66,40 | 66,50 | 101,40 | 101,60 | 101,50 | 3404,56 | 3365,74 | 3286,95 | 3352,42 | 30 |
| MISTURA 03 | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 31 | 66,60 | 66,50 | 66,40 | 66,50 | 100,90 | 101,36 | 101,13 | 3480,85 | 3350,86 | 3366,17 | 3399,29 | 30 |
| | 32 | 65,90 | 66,60 | 66,50 | 66,33 | 101,50 | 100,90 | 101,20 | 6426,94 | 6321,70 | 6465,47 | 6404,70 | 30 |
| | 33 | 65,90 | 66,10 | 66,40 | 66,13 | 101,70 | 101,40 | 101,55 | 5886,13 | 5723,46 | 5533,59 | 5714,39 | 30 |
| | 34 | 64,40 | 63,90 | 64,20 | 64,17 | 101,50 | 100,90 | 101,20 | 3577,92 | 3673,06 | 3948,47 | 3733,15 | 30 |

Quadro 12 – Ensaio Equivalente de Areia dos agregados miúdos [Areia natural]

| | | | |
|-----------------------------------|----------------------|------------------|------------|
| NORMA DNIT 054/97 | | | |
| Equivalente de Areia(-E.A) | | | |
| Estrada: | AREIA | Obra: | Mestrado |
| Trecho: | Britex | Registro: | |
| Estaca ou Km | | Amostra: | |
| Interessado: | Danilo F de Medeiros | Data: | 16/10/2007 |

| | | | | |
|-------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|--|
| Dados do Ensaio | | | | |
| | Amostra Total Seca | | Resumo da Gramulometria | |
| | | | (%) | |
| | Amostra Total Úmida : (g) | | Pedregulho > 2,0mm | |
| | Retida # N 10 (g) | | Areia Grossa: 2,0 - 0,42mm | |
| | Passando # 10 Úmida: (g) | | Areia fina: 0,42 - 0,074mm | |
| | Água : (g) | | Silte + Argila < 0,074mm | |
| | Passando # 10 Seca: (g) | | | |
| Amostra Total Seca: (g) | 110,00 | | | |
| | | Total | | |
| Amostra | Leitura no topo de Argila | Leitura no topo de Areia | E.A | |
| 1 | 13,7 | 13,5 | 98,5% | |
| 2 | 14,5 | 14,4 | 99,3% | |
| 3 | 14,4 | 14,000 | 97,2% | |
| Equivalente de areia | | | 98% | |

| | |
|---|--|
| $E.A = \frac{\text{Leit. Areia} \times 100}{\text{Leitura .Argila}} (\%)$ | |
| | |



Figura 1 – Ensaio de adesividade