

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

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

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE GESSO
DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DO CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A QUENTE**

RODRIGO DIAS FREITAS

Campina Grande
Data: MAIO/2010

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

RODRIGO DIAS FREITAS

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE GESSO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A QUENTE**

Campina Grande, PB – Brasil

Maio de 2010

RODRIGO DIAS FREITAS

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE GESSO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A QUENTE**

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

Área de concentração: Geotécnica

Prof. D.Sc. Erinaldo Hilário Cavalcante

Orientador

Campina Grande, PB – Brasil

Maio de 2010



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

F862e
2010

Freitas, Rodrigo Dias.

Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente / Rodrigo Dias Freitas. — Campina Grande, 2010.

161f. : il.

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

Referências.

Orientador: Prof. D.Sc. Erinaldo Hilário Cavalcante.

1. Pavimentação. 2. Misturas Asfálticas Densas. 3. Resíduo de Gesso. 4. Fíler. 5. Características Mecânicas I. Título.

CDU – 625.85(043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

RODRIGO DIAS FREITAS

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE GESSO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A QUENTE**

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

Dissertação Defendida e Aprovada em: 28 / 05 / 2010.

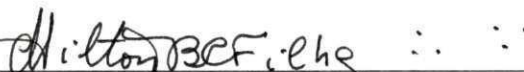
Pela banca examinadora:



Prof. Erinaldo Hilário Cavalcante, D.Sc. (Orientador)
Universidade Federal de Sergipe – UFS / DEC



Prof. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena, D.Sc. (Co-orientador)
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG / UAEC / PPGECA



Prof. Milton Bezerra das Chagas Filho, D.Sc. (Examinador Interno)
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG / UAEC / PPGECA



Profª. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D. (Examinadora Externa)
Universidade Federal do Ceará – UFC / DET / PETRAN

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado às pessoas que dedicaram suas vidas à minha:

Ao meu Senhor e Salvador JESUS CRISTO,

Aos meus pais, Canindé e Rosália,

À minha esposa, Kerma.

Ao meu filho, Heitor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, o Senhor, Soberano, criador dos céus e da terra. A Ele todo louvor, honra e glória, eternamente!

Ao professor D.Sc. Erinaldo Hilário Cavalcante, por todo o apoio no desenvolvimento desta pesquisa, pela disposição de ensinar e entusiasmo constantes.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e à Cidade de Campina Grande, que me acolheu durante seis anos, por ter me proporcionado o privilégio da conclusão de minha formação técnica e das boas amizades que não esquecerei.

À Universidade Federal de Sergipe (UFS), pela disposição da estrutura da universidade para esta pesquisa.

Ao grupo que integra o Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da Universidade Federal de Sergipe (GeoPav).

Aos servidores da UFS lotados no GeoPav, o Téc. José Willami dos Santos, e o Eng^o. M.Sc. Washington José Santos, por todo apoio e pelos ensinamentos compartilhados durante a pesquisa.

Aos bolsistas de graduação Marcio Barros Oliveira, Tito Renê Andrade Stumpf, e Léa Nascimento Dias, ao voluntário Eng. Gustavo Henrique Santana Dantas e ao auxiliar Anderson Gonçalves Santos, pelo apoio na realização dos ensaios laboratoriais.

Aos amigos professores M.Sc. Osvaldo de Freitas Neto e D.Sc. Fernando Silva Albuquerque, pela amizade.

À Petróleo Brasileiro S/A (Petrobras), na pessoa da química Rita Simões, pela caracterização e fornecimento do ligante utilizado na pesquisa.

À Empresa Municipal de Urbanismo da Prefeitura de Aracaju (EMURB), em especial ao Eng. Antônio José Silva Santos e do laboratorista José de Jesus Silva, pelo fornecimento dos agregados e de informações sobre a usina de asfalto daquele órgão público.

À equipe do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (LMP/UFC), especialmente à professora Ph.D. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, à Annie Karine do Nascimento e a Rômulo Jácome de Mesquita pelo apoio incondicional na moldagem dos corpos-de-prova Superpave e na nossa estada em Fortaleza.

Ao professor D.Sc. José Gomes da Silva, pelo apoio ao ingresso no curso de mestrado, e pelas aulas nas disciplinas de Pontes e Concreto Protendido na graduação.

Ao professor D.Sc. José Afonso Gonçalves de Macêdo, *in memoriam*, pessoa muito importante na consolidação dos meus propósitos como engenheiro, exemplo de compromisso com a engenharia na região Nordeste e meu orientador até o ano de 2008.

À Companhia Hidro Elétrica do São Francisco através do Eng^o José Vitorino da Silva, chefe da Divisão Regional de Operação e Manutenção de Campina Grande, e do Eng^o Max Norat Cavalcanti, chefe do Serviço de Manutenção de Campina Grande, e a todos os colegas daquela empresa que me apoiaram durante a fase em que, ao assumir o cargo de assistente técnico, pude continuar a minha graduação e iniciar o mestrado na UFCG.

Ao Ministério dos Transportes, através do Dr. Miguel Mário Bianco Masella, Secretário de Gestão dos Programas de Transportes, que possibilitou a continuidade do curso após meu ingresso neste órgão, bem como aos companheiros Eng. Augusto Rogério Souza Galvão, Eng. D.Sc. Paulo Roberto Farias Falcão, Eng. Eduardo Barros Rocha, Arq. Ana Alice Figueiredo, Eng. D.Sc. Alexandre da Costa Pereira, pelo apoio e amizade.

Aos professores Eng. José Eurico de Queiroz, Eng. Flávio Márcio, do Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte, que me apoiaram no início dos meus estudos na área de Construção Civil.

Aos meus pastores Rev. Hermany Rosa Vieira, Rev. Erivan Magno de Oliveira Fonseca Júnior, Rev. Frankes Rodrigo de Souza e Rev.^a Ana Isaura de Lima Souza pelas orações, apoio e amizade, e, através destes, à toda a Igreja Presbiteriana Independente do Brasil.

RESUMO

Os fortes investimentos dos setores público e privado visando atender à crescente demanda brasileira por habitação nos últimos anos, tem aumentado a utilização do gesso como material de construção devido às suas vantagens de aplicação e acabamento. No entanto, os resíduos gerados a partir da utilização desse material durante o processo construtivo não têm recebido uma destinação adequada e, na maioria dos centros urbanos, esses resíduos são dispostos em aterros, lixões ou em áreas impróprias. A legislação brasileira classifica o resíduo de gesso como material para o qual ainda não se dispõe de tecnologia para sua reciclagem, e proíbe o descarte em áreas expostas ao ar livre. Diante deste contexto, o presente trabalho aborda o assunto e apresenta resultados da aplicação de resíduos de gesso da construção civil como filer em misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico usinado a quente. Foram realizados ensaios de caracterização dos agregados, do ligante e do resíduo de gesso. Através da metodologia Marshall, determinou-se o teor de ligante de projeto para uma mistura sem gesso e misturas com 2% e 4% do resíduo entre os agregados, as quais são enquadradas na faixa "C" do DNIT. Para a caracterização mecânica das misturas foram moldados corpos-de-prova empregando-se as metodologias Marshall e Superpave. Foram realizados os ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, determinação da vida de fadiga por compressão diametral à tensão controlada, desgaste Cântabro, dano por umidade e deformação plástica por compressão uniaxial sob carga estática. Os resultados demonstraram que a adição do gesso, até um determinado limite, reduz o consumo de ligante, atende aos requisitos das especificações vigentes do DNIT e melhora as características mecânicas das misturas. Conclui-se, finalmente, que o uso de resíduos de gesso, com percentual da ordem de 2% nas misturas asfálticas do tipo CAUQ estudadas, apresenta-se como uma alternativa tecnicamente viável para a destinação deste rejeito.

Palavras-chave: pavimentação; misturas asfálticas densas; resíduo de gesso; filer; características mecânicas.

ABSTRACT

The heavy investment of public and private sectors in order to meet the growing Brazilian demand for housing in recent years, has increased the use of gypsum as a building material due to its advantages of application and finishing. However, the waste generated from this material during the construction process does not have proper destination and, in most urban centers, such waste is disposed in landfills, dumps or unsuitable areas. The Brazilian legislation classifies the gypsum waste as a material for which the recycling technology is not yet available and prohibits its disposal in outdoor areas. In this context, this study addresses the issue and shows results on the use of gypsum waste from construction as a filler in hot mix asphalt. Tests including the characterization of aggregates, binder and gypsum waste were carried out. The study determined, by the Marshall design method, the design binder concentration of a mixture without gypsum waste and with 2% and 4% of waste in aggregates, which mixtures are in range "C" of DNIT's specification. For the mechanical characterization of the mixtures, specimens were molded according to the Marshall and Superpave methodologies. The mechanical tests utilized were Tensile Strength by Diametrical Compression, Resilient Modulus, determination of fatigue life by diametrical compression under controlled stress made of loading, wastage by Cântabro, moisture induced and permanent deformation by uniaxial compression under static load. The results showed that the addition of gypsum to a limited extent, reduces the binder consumption, meets the requirements specified by DNIT and improves the mechanical characteristics of the mixtures. It has been finally concluded that, the use of waste gypsum with a percentage in the order of 2% in hot mix asphalt, shows to be a technically feasible alternative for its disposal.

Keywords: pavements; dense asphalt mixtures; waste gypsum; filler; mechanical characteristics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução do déficit habitacional do Brasil – 1991/2000/2004-2007 (BRASIL, 2009a).....	5
Figura 2.2 – Resíduos de gesso misturados a outros materiais em uma obra de reforma de estabelecimento comercial no centro de Aracaju (2009).....	10
Figura 2.3 – Resíduos de gesso misturados a outros materiais em uma construção de edifício residencial em Aracaju (2009).....	10
Figura 2.4 – Resíduos de gesso misturados a outros materiais em condições inadequadas em Aracaju (2010).	11
Figura 2.5 – Difrátograma de rejeito de gesso de construção reciclado (adaptado de SILVA <i>et al.</i> , 2006a).....	12
Figura 2.6 – Análise termogravimétrica de rejeito de gesso de construção reciclado (adaptado de SILVA <i>et al.</i> , 2006a).....	13
Figura 2.7 – Análise térmica diferencial de rejeito de gesso de construção reciclado (adaptado de SILVA <i>et al.</i> , 2006a).....	14
Figura 2.8 – Micrografia Eletrônica de Varredura de rejeito de gesso reciclado (adaptado de SILVA <i>et al.</i> , 2006a).....	14
Figura 2.9 – Distribuição da matriz de transportes de carga do Brasil e dos Estados Unidos da América (adaptado de BRASIL, 2006).....	15
Figura 2.10 – Esquema de um CGS (adaptado de Motta <i>et al.</i> , 1996, <i>apud</i> Marques, 2004).....	27
Figura 2.11 – Representação das tensões no centro da amostra de um CP cilíndrico (adaptado de BERNUCCI <i>et al.</i> , 2006).....	30
Figura 2.12 – Esquema do ensaio de compressão diametral (adaptado de BERNUCCI <i>et al.</i> , 2006).....	30
Figura 2.13 – Registro de deslocamento do ensaio de compressão diametral de carga repetida e forma da definição da parcela elástica para cálculo do MR.....	33
Figura 2.14 – Trincas em revestimentos asfálticos provocadas por fadiga (adaptado de BERNUCCI <i>et al.</i> , 2006).....	35
Figura 2.15 – Representação esquemática dos tipos de carregamento e seus efeitos no resultado da vida de fadiga de misturas asfálticas (adaptado de PINTO, 1991).....	37
Figura 2.16 – Descolamento e perda de agregados pela ação do tráfego (adaptado de BERNUCCI <i>et al.</i> , 2006).....	38
Figura 2.17 – Afundamento em trilhas de rodas.....	41
Figura 2.18 – Medida da deformação axial ao longo do corpo-de-prova (adaptado de BERNUCCI <i>et al.</i> , 2006).	43
Figura 3.1 – Fluxograma de ensaios de caracterização dos materiais usados nesta pesquisa.....	44
Figura 3.2 – Forma de acondicionamento do CAP fornecido pela Petrobras.....	45
Figura 3.3 – Aspecto do gesso coletado na obra.....	46
Figura 3.4 – Equipamento de abrasão <i>Los Angeles</i> usado na redução do diâmetro do resíduo de gesso.....	47
Figura 3.5 – Resíduo de gesso após redução de diâmetro no aparelho de abrasão <i>Los Angeles</i>	47
Figura 3.6 – Resíduo de gesso após passar na peneira 0,075 mm (# 200).....	47

Figura 3.7 – Distribuição da composição química do resíduo de gesso.....	49
Figura 3.8 – Distribuição dos tamanhos das partículas de resíduo de gesso obtida por difração a laser.	50
Figura 3.9 – Foto da usina de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) da EMURB.....	52
Figura 3.10 – Local de extração das amostras de brita na usina de CAUQ da EMURB.	53
Figura 3.11 – Local de extração das amostras de areia na usina de CAUQ da EMURB.	53
Figura 3.12 – Local de extração das amostras de cascalho na usina de CAUQ da EMURB.	53
Figura 3.13 – Brita de diâmetro máximo 12,5 mm, utilizada na mistura do CAUQ da EMURB.	54
Figura 3.14 – Areia utilizada na mistura do CAUQ da EMURB.	54
Figura 3.15 – Cascalho utilizado na mistura do CAUQ da EMURB.....	54
Figura 3.16 – Secagem dos agregados ao ar no GEOPAV.....	55
Figura 3.17 – Operação de quarteamento dos agregados para preparação de amostras para os ensaios desta pesquisa.....	55
Figura 3.18 – Granulometria da brita, do cascalho e da areia da EMURB.	56
Figura 4.1 – Enquadramento da mistura 0%, sem adição de gesso, na faixa C do DNIT.....	62
Figura 4.2 – Granulometria Superpave da mistura sem adição de gesso.	62
Figura 4.3 – Enquadramento da mistura, com 2% de gesso, na faixa C do DNIT.....	63
Figura 4.4 – Granulometria Superpave da mistura com 2% de gesso.....	63
Figura 4.5 – Enquadramento da mistura, com 4% de gesso, na faixa C do DNIT.....	64
Figura 4.6 – Granulometria Superpave da mistura com 4% de gesso.....	64
Figura 4.7 – Enquadramento das misturas 0%, 2% e 4% na faixa C do DNIT.....	65
Figura 4.8 – Granulometria Superpave das misturas 0%, 2% e 4% - $D_{MAX} = 12,5$ mm.	65
Figura 4.9 – Volumetria em uma mistura asfáltica (adaptado de BERNUCCI <i>et al.</i> , 2006).....	66
Figura 4.10 – Esquema de componentes em uma mistura asfáltica compactada (adaptado de ASPHALT INSTITUTE, 1995 <i>apud</i> BERNUCCI <i>et al.</i> , 2006).....	66
Figura 4.11 – Preparação dos materiais granulares para moldagem dos CPs.....	70
Figura 4.12 – Gráfico para determinação da temperatura do ligante e de compactação para moldagem dos CPs.	71
Figura 4.13 – Moldagem de CPs no compactador Marshall eletromecânico.....	72
Figura 4.14 – Desmoldagem, pesagem do CP seco e pesagem submersa do CP.....	74
Figura 4.15 – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall.....	74
Figura 4.16 – Compactador Marshall eletromecânico do GEOPAV.	74
Figura 4.17 – Variação do V_v em função do teor de ligante e de gesso nas dosagens.	75
Figura 4.18 – Variação do RBV em função do teor de ligante e de gesso nas dosagens.	76
Figura 4.19 – Variação da densidade aparente (D_a) em função do teor de ligante e de gesso nas dosagens.....	76
Figura 4.20 – Variação do VAM em função do teor de ligante e de gesso nas dosagens.....	77
Figura 4.21 – Teor de ligante <i>versus</i> V_v e RBV para a mistura de referência.	78
Figura 4.22 – Teor de ligante <i>versus</i> V_v e RBV para a mistura com 2% de gesso.	78

Figura 4.23 – Teor de ligante <i>versus</i> Vv e RBV para a mistura com 4% de gesso.	79
Figura 4.24 – Teores de ligante de projeto para as misturas estudadas.	80
Figura 4.25 – Variação da estabilidade em função do teor de ligante e de gesso nas dosagens.	81
Figura 4.26 – Variação da fluência em função do teor de ligante e de gesso nas dosagens.	81
Figura 4.27 – Variação da estabilidade Marshall (média) em função do percentual de gesso na mistura.	82
Figura 4.28 – Variação da fluência Marshall (média) em função do percentual de gesso na mistura.	83
Figura 4.29 – Fotos do Compactador Giratório Superpave - LMP/DET/UFC.	84
Figura 4.30 – Processo de moldagem de CP no Compactador Giratório Superpave - LMP/DET/UFC.	85
Figura 4.31 – Comparação visual dos corpos-de-prova moldados pela metodologia Marshall e Superpave - Mistura de referência.	86
Figura 4.32 – Comparação visual dos corpos-de-prova moldados pela metodologia Marshall e Superpave - Mistura 2%.	87
Figura 5.1 – Montagem do CP na prensa para ensaio de RT.	90
Figura 5.2 – Valores médios de RT em função do percentual de gesso na mistura.	91
Figura 5.3 – Equipamento para ensaio do módulo de resiliência de misturas asfálticas UFS/DEC/GEOPAV.	94
Figura 5.4 – Tela de configurações para ensaio de MR do sistema de aquisição de dados do SIEMBS/UFS.	95
Figura 5.5 – Tela de monitoramento do ensaio de MR em andamento do sistema de aquisição de dados do SIEMBS/UFS.	95
Figura 5.6 – Tela de resultados do ensaio de MR em andamento do sistema de aquisição de dados do SIEMBS/UFS.	96
Figura 5.7 – Valores de MR em função do percentual de gesso nas misturas.	97
Figura 5.8 – Valores de MR e MR/RT em função do percentual de gesso nas misturas estudadas.	99
Figura 5.9 – Foto do arranjo do CP durante o ensaio de vida de fadiga por compressão diametral sob tensão controlada.	100
Figura 5.10 – Posição da câmera durante o ensaio de fadiga.	100
Figura 5.11 – Tela de acompanhamento do ensaio de fadiga do sistema de aquisição de dados do SIEMBS/UFS com auxílio de outros aplicativos.	101
Figura 5.12 – Vida de fadiga <i>versus</i> diferença de tensões.	102
Figura 5.13 – Aspectos de uma amostra de CAUQ antes e após o ensaio de desgaste Cântabro.	104
Figura 5.14 – Aspecto dos CPs antes e após o ensaio de desgaste Cântabro.	105
Figura 5.15 – Valores do desgaste obtido no ensaio de Cântabro em função do percentual de gesso nas misturas.	106
Figura 5.16 – Fotos do processo de saturação dos corpos-de-prova no ensaio de dano por umidade induzida.	108
Figura 5.17 – Valores da resistência à tração de CPs condicionados e não condicionados em função do percentual de gesso.	109
Figura 5.18 – Valores da Relação de Resistência à Tração (RRT) em função do percentual de gesso.	110

Figura 5.19 – Aspectos do corpo-de-prova com 0% de gesso no ensaio de dano por umidade – moldagem Marshall.....	111
Figura 5.20 – Aspectos do corpo-de-prova com 2% de gesso no ensaio de dano por umidade – moldagem Marshall.....	111
Figura 5.21 – Aspectos do corpo-de-prova com 4% de gesso no ensaio de dano por umidade – moldagem Marshall.....	111
Figura 5.22 – Fotos de um dos ensaios de creep estático em andamento.....	113
Figura 5.23 – Curvas de creep das misturas.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação dos RCD segundo o CONAMA (BRASIL, 2009b).....	6
Tabela 2.2 – Produção de RCD em algumas cidades do estado de São Paulo (SINDUSCON-SP, 2005).....	7
Tabela 2.3 – Composição média dos RCD de Aracaju, segundo a Resolução 307 do CONAMA (adaptado de DALTRO FILHO <i>et al</i> , 2006).	8
Tabela 2.4 – Análise semi-quantitativa do rejeito de gesso de construção (adaptado de SILVA <i>et al.</i> , 2006a)....	12
Tabela 2.5 – Distribuição das rodovias municipais, estaduais e federais em quilômetros (BRASIL, 2010).	16
Tabela 2.6 – Classificação dos revestimentos dos pavimentos rodoviários (DNIT, 2006b).	17
Tabela 2.7 – Granulometria exigida para o filer pelo DNIT (DNER, 1997a).	19
Tabela 2.8 – Granulometria exigida para o filer pela ASTM (ASTM, 1985).....	19
Tabela 2.9 – Fatores que afetam a rigidez e o comportamento à fadiga de concretos asfálticos (Adaptado de PINTO,1991).	36
Tabela 2.10 – Ensaio de avaliação de susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas (adaptado de Furlan, 2006).	40
Tabela 3.1 – Resultados da caracterização do CAP utilizado na pesquisa.....	45
Tabela 3.2 – Composição química (% em massa) da amostra analisada.	48
Tabela 3.3 – Valores da massa específica real do resíduo de gesso.....	50
Tabela 3.4 – Verificação da perda de massa por secagem do resíduo de gesso.	51
Tabela 3.5 – Granulometria - Porcentagens de materiais passando nas peneiras.	56
Tabela 3.6 – Resultados dos ensaios de abrasão <i>Los Angeles</i> realizados com a brita 12,5 mm.	57
Tabela 4.1 – Misturas estudadas, quanto à porcentagem de resíduo de gesso adicionado aos agregados.....	59
Tabela 4.2 – Pontos de controle e zona de restrição Superpave, para TNM = 12,5 mm (adaptado de BERNUCCI <i>et al.</i> , 2006).	61
Tabela 4.3 – Distribuição granulométrica da mistura de referência.....	62
Tabela 4.4 -- Distribuição granulométrica da mistura 2%.....	63
Tabela 4.5 – Distribuição granulométrica da mistura 4%.....	64
Tabela 4.6 – Composição das três misturas estudadas.	65
Tabela 4.7 – Temperaturas de mistura e compactação dos materiais.	71
Tabela 4.8 – Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura 0%.....	77
Tabela 4.9 – Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura 2%.....	78
Tabela 4.10 – Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura 4%.....	79
Tabela 4.11 – Determinação do teor de ligante de projeto.	79
Tabela 4.12 – Determinação da estabilidade e fluência no teor de ligante de projeto de cada mistura.	82
Tabela 4.13 – Parâmetros volumétricos – comparação entre as moldagens.	86
Tabela 5.1 – Quantidade de corpos-de-prova utilizados para dosagem Marshall e ensaios de caracterização mecânica.	89

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de resistência à tração indireta.	90
Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência.	96
Tabela 5.4 – Módulos de resiliência, resistência e MR/RT de misturas investigadas no país (25 °C).....	98
Tabela 5.5 – Módulos de resiliência, resistência à tração e MR/RT das misturas estudadas (25 °C)	98
Tabela 5.6 – Valores de K_2 , n_2 e do coeficiente de determinação (R^2) do modelo de vida de fadiga.	103
Tabela 5.7 – Resultados do ensaio Cântabro.....	106
Tabela 5.8 – Valores da RT obtidos dos ensaios de resistência à tração dos CPs condicionados.	109
Tabela 5.9 – Relação de Resistência à Tração (RRT)	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

#	Abertura de peneira
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation</i>
AAUQ	Areia Asfalto Usinado a Quente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPv	Associação Brasileira de Pavimentação
ANP	Agência Nacional de Petróleo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CGS	Compactador Giratório Superpave
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CP	Corpo-de-prova
D _a	Densidade aparente da mistura compactada
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DER SE	Departamento Estadual de Infra-estrutura Rodoviária de Sergipe
DET	Departamento de Engenharia de Transportes
DMM	Densidade Máxima Medida
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
EMURB	Empresa Municipal de Obras e Urbanização
g	Grama
Hz	Hertz
IME	Instituto Militar de Engenharia
kg	Quilograma
kgf	Quilograma-força
kPa	Quilopascal
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformers</i>
ml	Mililitro
mm	Milímetro
mm Hg	Milímetro de mercúrio

MMA	Ministério do Meio Ambiente
MPa	Megapascal
MR	Módulo de Resiliência
N	Número de passadas do eixo padrão simples em uma só direção; Número de aplicações de carga
NBR	Norma Brasileira Registrada
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
N_f	Vida de fadiga
°C	Grau Celsius
P	Poise
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S/A
PMA	Prefeitura Municipal de Aracaju
PMQ	Pré-Misturado a Quente
RCC	Resíduos de Construção Civil
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RLAM	Refinaria Landulpho Alves
rpm	Rotações por minuto
RT	Resistência à Tração por compressão diametral
SE	Sergipe
SIEMBS	Sistema Integrado de Ensaio para Misturas Betuminosas e Solos
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
SSF	Segundo Saybolt-Furol
SUPERPAVE	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
TNM	Tamanho Nominal Máximo
TP	Teor de ligante de Projeto
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFS	Universidade Federal de Sergipe
Vv	Volume de vazios
μ	Coefficiente de Poisson
σ_t	Tensão de tração
$\Delta\sigma$	Diferença entre tensões
ϵ	Deformação específica

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1. Os resíduos da construção civil	5
2.2. Resíduo de gesso e sua destinação	8
2.3. Pavimentos rodoviários.....	15
2.4. Fíler em misturas asfálticas	18
2.5. Misturas asfálticas com adição de resíduos	21
2.6. Métodos de dosagem do concreto asfáltico.....	25
2.6.1. Dosagem Marshall	26
2.6.2. Dosagem Superpave	26
2.7. Características mecânicas das misturas asfálticas	28
2.7.1. Resistência à tração.....	29
2.7.2. Resiliência.....	30
2.7.3. Fadiga.....	34
2.7.4. Desgaste.....	38
2.7.5. Susceptibilidade à água	39
2.7.6. Deformação permanente	41
CAPÍTULO 3. OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	44
3.1. Obtenção e caracterização física e reológica do ligante	44
3.2. Obtenção e caracterização do resíduo de gesso	46
3.2.1. Análise química por difração de raio X do resíduo de gesso	48
3.2.2. Granulometria a laser.....	49
3.2.3. Massa específica real	50
3.2.4. Verificação da perda de massa por secagem	51
3.3. Obtenção e caracterização dos demais agregados	52
3.3.1. Análise granulométrica.....	55
3.3.2. Desgaste por abrasão <i>Los Angeles</i>	57
3.3.3. Massa específica e absorção.....	57
3.3.4. Equivalente de areia	58

CAPÍTULO 4. DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	59
4.1. Distribuição dos agregados	60
4.2. Parâmetros volumétricos	66
4.3. Moldagem dos corpos-de-prova pela metodologia Marshall	69
4.4. Teor de ligante de projeto	75
4.5. Estabilidade e fluência do ensaio Marshall	80
4.6. Moldagem de corpos-de-prova pela metodologia Superpave.....	83
CAPÍTULO 5. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	88
5.1. Programa experimental	88
5.2. Resistência à tração por compressão diametral	89
5.3. Módulo de resiliência.....	92
5.4. Relação entre módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT).....	98
5.5. Fadiga por compressão diametral sob tensão controlada	99
5.6. Desgaste de misturas betuminosas por abrasão – ensaio Cântabro.....	103
5.7. Efeito deletério da água.....	107
5.8. Deformação permanente por compressão uniaxial sob carga estática	112
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS	114
6.1. Conclusões.....	114
6.1.1. Quanto à caracterização do resíduo de gesso.....	114
6.1.2. Quanto à dosagem Marshall das misturas asfálticas	115
6.1.3. Quanto à caracterização mecânica.....	115
6.1.4. Quanto à diferença entre moldagem Marshall e Superpave	116
6.1.5. Considerações finais.....	117
6.2. Sugestões de pesquisas futuras	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120
ANEXOS	132

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é reconhecidamente importante na economia nacional, em virtude de características como: participação no produto interno bruto, postos de trabalho gerados e extensa cadeia produtiva. O atual crescimento do setor da construção civil, motivado pelos fortes investimentos do estado brasileiro e da iniciativa privada no atendimento das demandas por infraestrutura de logística, de energia e de habitação, tem resultado numa maior utilização de insumos e matérias-primas. No entanto, o incremento das obras no país tem gerado um aumento na produção de resíduos poluentes, que são, em sua maioria, indevidamente tratados ou apenas descartados em áreas impróprias.

Apesar da melhoria dos sistemas de qualidade de várias empresas construtoras, que têm investido em certificações ambientais e, conseqüentemente, na diminuição da geração de resíduos da construção e demolição (RCD), ações de sustentabilidade não são reproduzidas ainda na maioria das construtoras ou nas pequenas construções, que geram mais resíduos, e nem sempre dão destinação adequada ao chamado entulho.

Paralelamente, se formou no Brasil, a partir do século passado, mas principalmente após a promulgação da constituição de 1988, uma estrutura de normalização e fiscalização apoiada em uma legislação ambiental, que, por vezes, não é cumprida em sua plenitude. Nisso se enquadra a questão da gestão dos resíduos da construção e demolição, pois as exigências legais ainda não são seguidas inteiramente em todos os municípios do país.

Isso se aplica aos resíduos de gesso gerados na indústria da construção civil. O consumo de gesso vem aumentando devido à conjuntura do setor da construção e o surgimento de novas tecnologias e processos produtivos, que têm viabilizado a aplicação desse material em soluções que faziam uso de outros produtos. As normas que tratam da gestão de resíduos da construção descrevem o resíduo de gesso como um material que deve ter um tratamento diferenciado por ter potencial poluente quando é indevidamente descartado. No entanto, o que comumente se vê, é o despejo desse material junto com os demais resíduos da construção em áreas de aterro sem o devido tratamento, contrariando, assim, a legislação e poluindo o ambiente. Há, também, dificuldade da indústria da construção estocar seus resíduos em aterros, os quais ficam cada vez mais restritos e distantes das fontes geradoras.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas publicou em 2004 as normas: NBR 15115 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de

pavimentação; e a NBR 15116 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Entretanto, essas normas ainda não preveem a utilização do resíduo de gesso em pavimentos.

Assim, faz-se necessária a adoção de medidas que possam garantir ao resíduo de gesso uma destinação ambientalmente segura, econômica e tecnicamente viável. Dentro desse contexto, esta pesquisa se propõe a contribuir para minimizar esse problema que a engenharia enfrenta e precisa superar.

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar tecnicamente o potencial de utilização de resíduos de gesso da construção civil como filer em misturas asfálticas do tipo Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ), no que diz respeito à influência da sua adição sobre algumas características mecânicas, considerando sua aplicação em revestimentos de pavimentos.

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Caracterizar o resíduo de gesso e aplicá-lo como filer em misturas asfálticas;
- Realizar a dosagem Marshall de misturas asfálticas com a utilização de resíduos de gesso em diferentes proporções, determinando os teores de ligante de projeto;
- Comparar os parâmetros volumétricos obtidos na dosagem Marshall para misturas com proporções diferentes de gesso;
- Avaliar a influência do resíduo de gesso nas características mecânicas de misturas asfálticas;
- Comparar as características mecânicas das misturas asfálticas com adição de resíduo de gesso, com uma mistura sem gesso, moldados de acordo com as metodologias Marshall e Superpave;
- Determinar uma quantidade de resíduo de gesso que pode ser adicionada à mistura estudada que possa garantir ou melhorar as características mecânicas.

Para alcançar os objetivos propostos foi adotada uma pesquisa exploratória, através de um levantamento bibliográfico a fim de recuperar o conhecimento científico acumulado sobre o problema, e a caracterização experimental de misturas asfálticas, que foram dosadas com diferentes proporções de resíduos de gesso adicionadas aos agregados.

Este trabalho está organizado em um volume, da seguinte forma:

Neste Capítulo 1 é feita uma introdução do tema, discutido o problema de pesquisa e definidos os objetivos a serem alcançados.

O Capítulo 2 mostra uma revisão da bibliografia que trata dos resíduos da construção civil, especialmente o de gesso, e das características mecânicas de misturas asfálticas densas.

No Capítulo 3, os materiais utilizados na pesquisa são devidamente caracterizados para utilização como mistura asfáltica.

O Capítulo 4 é dedicado à apresentação dos procedimentos de dosagem das misturas e da preparação dos corpos-de-prova utilizados no estudo das propriedades mecânicas.

No Capítulo 5 são apresentados os métodos empregados para a avaliação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas, o registro e a análise dos resultados obtidos durante a fase experimental.

No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões e sugestões para pesquisas futuras sobre esse tema.

Além dos capítulos anteriores, na sequência são apresentadas as referências bibliográficas consultadas e os anexos, contendo planilhas de ensaios realizados.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O conceito de sustentabilidade vem sendo construído no decorrer dos anos com a contribuição de vários pesquisadores, organismos e fóruns que tratam dessa temática. Uma definição para sustentabilidade, dada por Chen & Chambers (1999) *apud* John (2000), é que, desenvolvimento sustentável é aquele que “permite atender às necessidades básicas de toda a população e garante a todos a oportunidade de satisfazer suas aspirações para uma vida melhor sem, no entanto, comprometer a habilidade das gerações futuras atenderem suas próprias necessidades”. Esse tema vem sendo discutido por toda a comunidade internacional e se materializa através da implantação de políticas públicas, ou de investimentos de empresas ou grupos de direito privado, ou ainda a partir de iniciativas individuais dos cidadãos.

Para John (2000), o crescimento da economia da segunda metade do século XX não conseguiu reverter aspectos que comprometem um desenvolvimento sustentável, sendo eles: o aquecimento global, o consumo de energia e suas formas de obtenção, a degradação da camada de ozônio, a poluição por nutrientes ou eutrofização, poluição do ar e a chuva ácida, consumo de matérias-primas não renováveis, a exclusão social, e a geração de resíduos.

No que diz respeito à geração de resíduos, o aumento da produção industrial de bens para atender às necessidades da sociedade de consumo no formato atual, tem apresentado um aumento da sua quantidade e, embora seja possível reduzir essa quantidade durante a produção, eles sempre serão gerados. O desenvolvimento de tecnologias para reciclagem da enorme quantidade e variedade de resíduos, que se mostrem ambientalmente seguras, economicamente viáveis, e cujos produtos apresentem desempenho técnico satisfatório, é um desafio que se apresenta para a comunidade científica.

Associado a isso, o país se encontra, atualmente, inserido numa conjuntura político-econômica que tem permitindo a retomada do investimento em obras de infraestrutura urbana, de logística e energética que garantem as condições de desenvolvimento da indústria da construção civil. Um dos setores atualmente favorecido pela política de investimentos públicos e privados é o de habitação, o qual tem o desafio de diminuir o déficit habitacional que se formou, principalmente nas regiões metropolitanas, com forte contribuição do êxodo da população rural para as cidades nas últimas décadas. Na Figura 2.1 é possível observar a recente evolução do déficit habitacional do Brasil.

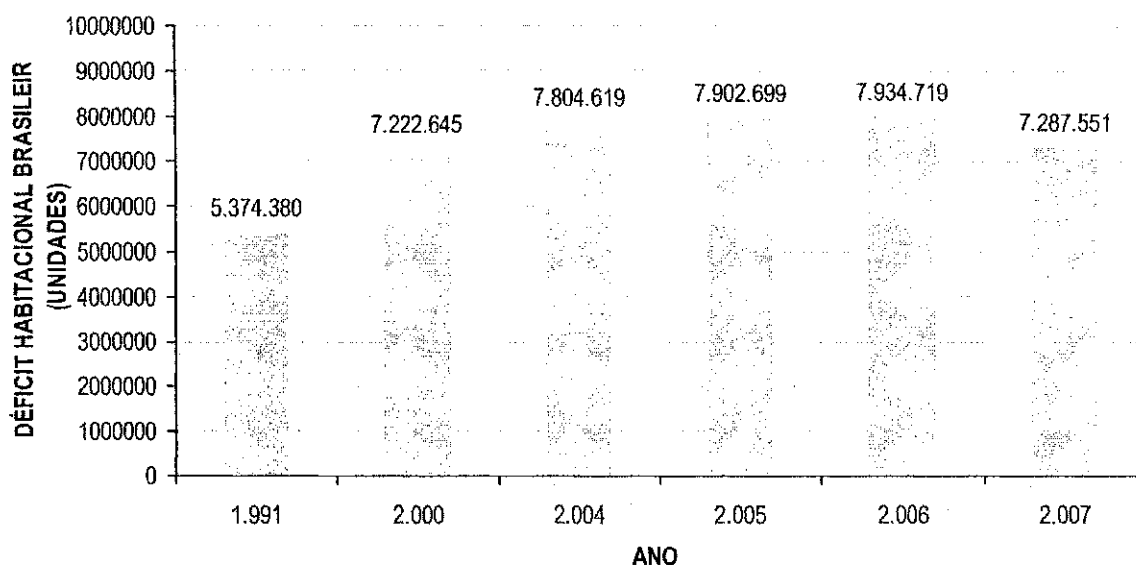


Figura 2.1 – Evolução do déficit habitacional do Brasil – 1991/2000/2004-2007 (BRASIL, 2009a).

A construção civil está inserida nesse contexto como uma atividade industrial relevante para o desenvolvimento sócio-econômico, mas, que se caracteriza pela extensa utilização e transformação dos recursos naturais em matérias-primas, consumo de energia, poluição do ar, solo e mananciais de água, altera a paisagem e produz vários tipos de resíduos. Tudo isso gera demandas ambientais que precisam ser atendidas, no controle da extração dos materiais, evitando o desperdício durante o processo construtivo, aproveitando o grande potencial para reciclagem dos materiais não utilizados, ou descartados, e promovendo outras ações mitigadoras e compensatórias dentro de sua própria cadeia produtiva.

2.1. Os resíduos da construção civil

A legislação ambiental brasileira estabelece que a responsabilidade pelos resíduos das atividades de construção, reformas, reparos e demolições de estruturas e estradas é dos próprios geradores do resíduo (BRASIL, 2009b). E ainda, que esses rejeitos não devem mais ser destinados a aterros de resíduos domiciliares, áreas de "bota fora", encostas, corpos d'água, lotes vazios ou áreas protegidas pela legislação ambiental. Existem as determinações de que cada município e o Distrito Federal devem elaborar um plano integrado de gerenciamento do Resíduo da Construção e Demolição

(RCD) oriundo dos grandes geradores; realizarem o cadastramento de áreas aptas para o recebimento, triagem e armazenamento temporário de pequenos volumes para destinação posterior dos resíduos de pequenos geradores; são responsáveis pelo licenciamento ambiental para as áreas de beneficiamento e disposição final dos resíduos; dentre outros. Além disso, a parcela de RCD que pode ser reciclada deve ser reinserida no processo produtivo ou deve ser destinada a áreas de aterro exclusivo para posterior utilização.

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), órgão do Ministério do Meio Ambiente (MMA), em sua Resolução 307 de 05 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de RCD, faz a classificação destes conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classificação dos RCD segundo o CONAMA (BRASIL, 2009b).

Classe	Características
A	<p>São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplenagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios, etc.) produzidas nos canteiros de obras.
B	São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros.
C	São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso.
D	São resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais, e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

No entanto, a maioria dos municípios do Brasil não dispõe de um plano de gerenciamento dos seus resíduos de construção. Tavares & Melo (2008) afirmam que, em Aracaju, a utilização de RCD ainda é incipiente, mesmo sabendo-se que 75% dos RCD dispostos nos canteiros de obras e em depósitos irregulares tenham grande potencial para reutilização ou reciclagem. No entanto, nem a Administração Estadual do Meio Ambiente (ADEMA), nem a Empresa Municipal de Serviços Urbanos (EMSURB), têm conseguido realizar a fiscalização dos projetos de gestão do RCD nos canteiros de obras. Assim, muitos construtores não fazem a triagem e acondicionamento dos resíduos, preocupando-se apenas com a destinação em locais aprovados pelo município ou mesmo locais clandestinos e inadequados.

Associado à deposição inadequada dos resíduos, estão: a ocorrência de enchentes, causadas pelo assoreamento de córregos, canais e galerias de águas pluviais; prejuízos à paisagem; obstrução das vias de tráfego de veículos e pedestres; proliferação de doenças; e poluição de mananciais ou áreas agricultáveis. Essa situação pode começar a mudar com a implantação de usinas de reciclagem de RCD em municípios e regiões metropolitanas de médio e grande porte, para utilização em obras do próprio município.

Os dados sobre a produção e composição do RCD são muito controversos (PINTO, 1999). Mas o fato é que a construção civil gera uma parcela predominante da massa total dos resíduos sólidos produzidos nas cidades. A Tabela 2.2 mostra os números apontados por estudos realizados em diversas cidades. Em Aracaju, segundo Daltro Filho *et al.* (2006), a produção de RCD é de 13.135 t/mês, o que representa 65% dos resíduos sólidos urbanos desse município.

Tabela 2.2 – Produção de RCD em algumas cidades do estado de São Paulo (SINDUSCON-SP, 2005).

Município	Geração diária (toneladas)	Participação em relação aos resíduos sólidos urbanos (%)
São Paulo	17.240	55
Guarulhos	1.308	50
Diadema	458	57
Campinas	1.800	64
Piracicaba	620	67
São José dos Campos	733	67
Ribeirão Preto	1.043	70
Jundiaí	712	62
São José do Rio Preto	687	58
Santo André	1.013	54

Estudos feitos por Daltro Filho *et al.* (2006) determinaram a massa específica aparente média de 1.235 kg/m³, e a caracterização dos RCD gerados em Aracaju conforme dados apresentados na Tabela 2.3. Percebe-se uma predominância de resíduos de origem mineral (argamassas, concreto e materiais cerâmicos, etc.). Estas informações permitem a avaliação de que as características do RCD da cidade de Aracaju apresentam conformidade com o produzido em outras cidades brasileiras (PINTO, 1999).

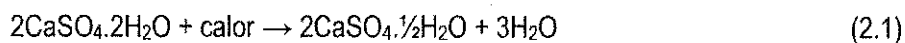
Tabela 2.3 – Composição média dos RCD de Aracaju, segundo a Resolução 307 do CONAMA (adaptado de DALTRO FILHO *et al.*, 2006).

Classificação	Componente	(%)	% da classe
A	Argamassa	36,00	73,44
	Brita	0,23	
	Concreto	0,35	
	Cerâmicos	14,42	
	Mármore	0,44	
	Pedra	2,04	
	Solo/Areia	19,96	
B	Madeira	1,28	2,46
	Metal	0,06	
	Papel	0,46	
	Papelão	0,28	
	Plásticos	0,34	
	Vidro	0,04	
C	Gesso	3,39	23,24
	Restos	19,85	
D	Latas de tinta e derivados	0,04	0,86
	Restos de telhas de cimento amianto	0,82	
Total		100	100

2.2. Resíduo de gesso e sua destinação

O gesso é um produto da calcinação da gipsita. A gipsita é um sulfato de cálcio hidratado cuja fórmula química é $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, tem dureza 2 na escala de Mohs, ou seja, a gipsita pode ser riscada ou arranhada pela unha com um pouco de dificuldade, densidade de aproximadamente 2,35, é bastante solúvel em água e sua cor é variável entre incolor, branca, cinza ou amarronzada, o que depende das impurezas contidas nos cristais. O sulfato de cálcio é um composto químico formado por um cátion de cálcio (Ca^{2+}) e um ânion sulfato (SO_4^{2-}) por ligação iônica (elétrica). A sua composição química média apresenta 32,5% de CaO, 46,6% de SO_3 e 20,9% de H_2O . Trata-se de um mineral que, sob a ação do calor (em torno de 160°C), desidrata-se parcialmente, originando o semi-hidrato,

conforme a Equação 2.1, que é conhecido comercialmente como gesso (DNPM, 2009). O processo de hidratação do gesso de construção resulta em produto com composição idêntica a que o originou, ou seja, na gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).



Segundo o Banco do Nordeste (BNB, 2010), o Brasil dispõe da maior reserva mundial de gipsita, dispondo de 1,2 bilhões de toneladas com alto índice de pureza, e de um mercado interno de consumo de gesso em forte crescimento. O estado de Pernambuco produz 1.393.113 toneladas de gesso por ano, o que corresponde a 92% da produção nacional. Destes, 61% é destinado à fabricação de blocos e placas, 35% para revestimentos, 3% para moldes aplicados na indústria cerâmica e 1% é destinado a outras aplicações (SINDUGESSO, 2009). Existe uma tendência de crescimento na utilização do gesso como aglomerante devido a questões de ordem ambiental e econômica, pois sua fabricação requer menor quantidade de energia em seu processo produtivo, comparado com o cimento, por exemplo. Além disso, o avanço da tecnologia vem dando ao gesso um espaço cada vez mais relevante nos processos construtivos.

O gesso tem sua maior aplicação na construção civil. Na indústria cimenteira, a gipsita é adicionada ao clínquer durante a moagem, na proporção de 2% a 5%, para retardar o tempo de pega do cimento. Também é utilizada na agricultura como agente corretivo de acidez, fonte de cálcio e fertilizante, na confecção de moldes para as indústrias cerâmica, metalúrgica e de plásticos, em moldes artísticos, ortopédicos e dentários, como aglomerante do giz e na briquetagem, ou seja, a aglomeração de partículas finas, do carvão. Por sua resistência ao fogo, se emprega gesso na confecção de portas corta fogo, na mineração de carvão para vedar lâmpadas, engrenagens e outras aplicações onde há perigo de explosão de gases. Isolantes para cobertura de tubulações e caldeiras são confeccionados com uma mistura de gesso e amianto. Isolantes acústicos são obtidos pela adição de material poroso ao gesso (LYRA SOBRINHO *et al.*, 2009).

A construção civil é também a grande geradora de resíduos de gesso. Estima-se que, no Brasil, as perdas são de aproximadamente 5% (JOHN & CINCOTTO, 2010). Estudos que avaliaram a composição média dos resíduos da construção civil na cidade de Aracaju, concluíram que 3,39%, da produção diária de 530 t, são constituídos de gesso. Isso corresponde a cerca de 17,97 t/dia, ou 546,47 t/mês (DALTRO FILHO *et al.*, 2006). Ribeiro (2006) afirma que a região metropolitana de Recife gera aproximadamente 1260 m³/dia de entulho, dos quais 50 m³/dia, ou seja, 18.000 m³/ano são de resíduos de gesso, sem considerar o que é descartado clandestinamente. Devido à baixa quantidade de gesso

em relação aos demais rejeitos de obra, é corrente a prática de não separar os resíduos de acordo com a classificação, contrariando as determinações da legislação ambiental vigente. Nas Figuras 2.2 e 2.3 apresentam-se formas de deposição de resíduos de gesso comumente praticadas nas obras, e na Figura 2.4 mostra-se as condições que o resíduo de gesso é descartado nas áreas irregulares.



Figura 2.2 – Resíduos de gesso misturados a outros materiais em uma obra de reforma de estabelecimento comercial no centro de Aracaju (2009).



Figura 2.3 – Resíduos de gesso misturados a outros materiais em uma construção de edifício residencial em Aracaju (2009).



Figura 2.4 – Resíduos de gesso misturados a outros materiais em condições inadequadas em Aracaju (2010).

No que diz respeito a aplicações de resíduos de gesso, a Resolução 307 do CONAMA revela que ainda não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação.

Quando depositado em aterros, o gesso em contato com a umidade e condições anaeróbicas, com baixo pH, e sob ação de bactérias redutoras de sulfatos, condições presentes em muitos aterros sanitários e lixões, pode formar gás sulfídrico (H_2S), que possui odor característico de ovo podre, tornando-se tóxico e inflamável (JOHN & CINCOTTO, 2010). Lins *et al.* (2005) afirmam, ao analisar os impactos causados pelos gases emitidos em aterros de resíduos sólidos à saúde humana, que o H_2S é um ácido forte com alto poder corrosivo, altamente tóxico e irritante, que atua sobre o sistema nervoso, os olhos e as vias respiratórias, e, dependendo da exposição do homem ao gás, pode causar excitação seguida de depressão, fraqueza, dor de cabeça, náusea, vômito, amnésia, irritabilidade, delírio, sonolência, convulsões e morte.

A Associação Brasileira de Fabricantes de Chapas para Drywall (DRYWALL, 2009) publicou, em 2009, uma cartilha que trata da coleta, armazenagem e destinação para a reciclagem de resíduos de gesso da construção civil. Nessa cartilha mostra-se que os resíduos de gesso readquirem as características químicas da gipsita, que, quando separados dos outros resíduos da construção, constituem um material homogêneo, que pode ser reintegrado à cadeia produtiva. De acordo com a DRYWALL (2009), pesquisas sobre a reciclagem do gesso vem sendo realizadas desde o final da

década de 1990. A reutilização do resíduo teve avanço na aplicação como aditivo na produção de cimento, ou como material para correção do solo na agricultura, além de outras aplicações em menor escala, tais como: reinserção em pequenas proporções na produção de gesso, aditivo para compostagem, absorvente de óleo, forração para animais, controle de odores em estábulos, e secagem de lodo de esgoto (DRYWALL, 2009).

Silva *et al.* (2006a) avaliaram a incorporação de resíduos de gesso de construção em formulações de massa cerâmica. Na Tabela 2.4 apresenta-se a caracterização química semi-quantitativa do gesso de construção reciclado realizada por fluorescência de raio-X. Na Figura 2.5, é apresentado o diagrama de difração de raio-X do rejeito do gesso de construção reciclado, que relaciona a intensidade dos raios refletidos com o ângulo de aplicação da radiação, e é notada a presença predominante da gipsita. As análises termogravimétrica (TGA) e térmica diferencial (DrTGA), estão mostradas na Figura 2.6.

Tabela 2.4 – Análise semi-quantitativa do rejeito de gesso de construção (adaptado de SILVA *et al.*, 2006a)

Composto químico	Denominação	Percentual na amostra (%)
S	Enxofre	23,13
Ca	Cálcio	75,35
Si	Silício	0,17
Al	Alumínio	0,19
Fe	Ferro	0,20
K	Potássio	0,17
Sr	Estrôncio	0,10
	Outros	0,69
Total		100,00

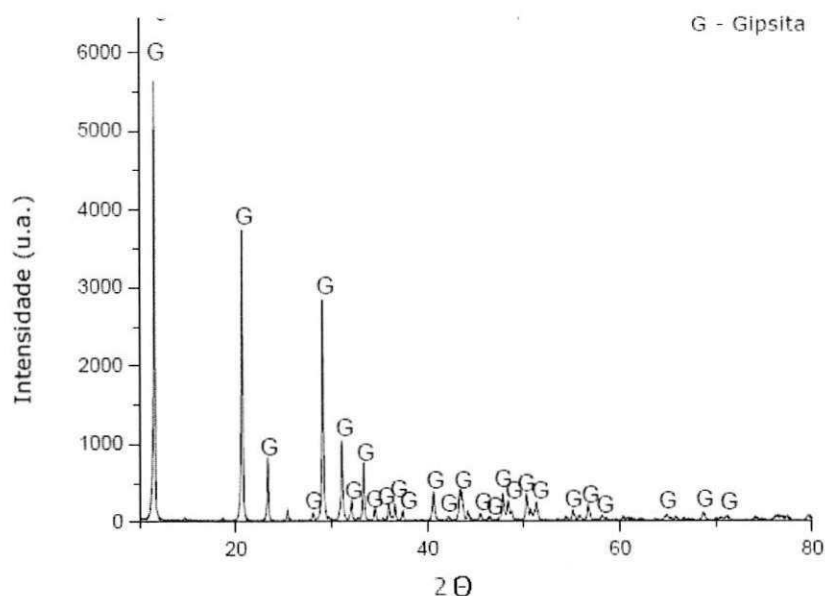


Figura 2.5 – Difratograma de rejeito de gesso de construção reciclado (adaptado de SILVA *et al.*, 2006a).

Na pesquisa realizada por Silva *et al.* (2006a), o rejeito de gesso não foi calcinado, ou seja, submetido a elevadas temperaturas, antes da aplicação na mistura. Assim, o material não perdeu a sua água estrutural. Por isso, pode ser considerado a partir do que é observado na análise termogravimétrica, mostrada na Figura 2.6, que há uma perda de massa de aproximadamente 20% a uma temperatura aproximada de 150 °C, onde ocorreu a perda de água. Essa temperatura, como se verá adiante, é atingida pelos materiais no processo de mistura dos agregados com o ligante.

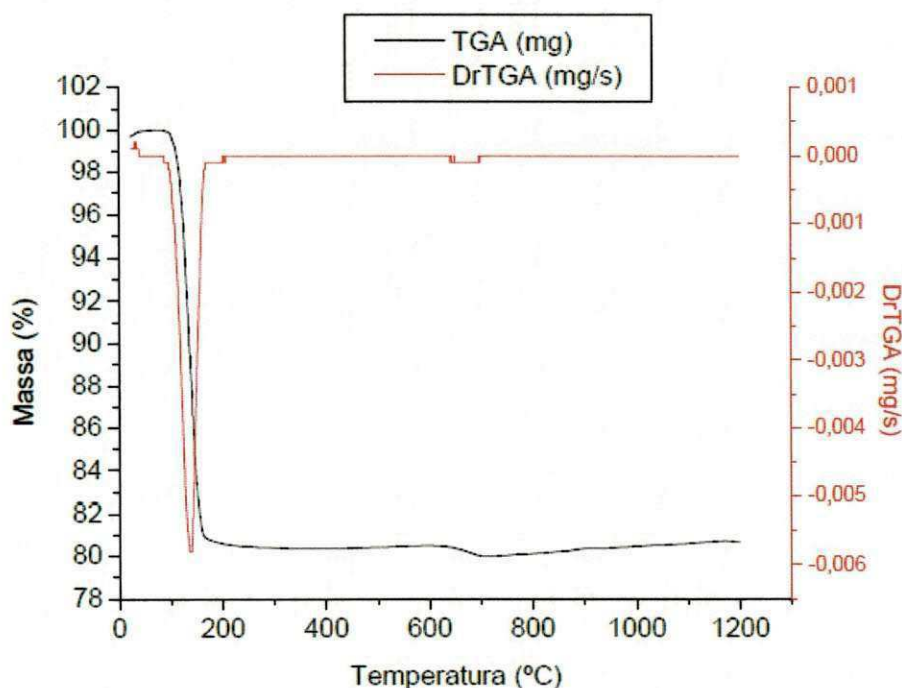


Figura 2.6 – Análise termogravimétrica de rejeito de gesso de construção reciclado (adaptado de SILVA *et al.*, 2006a).

Na análise térmica diferencial, mostrada na Figura 2.7, percebe-se que o resíduo de gesso só adquire características próximas de um material inerte após ser submetido à temperaturas muito altas, da ordem de 900 °C, o que requer um alto consumo de energia no processo de adequação do material. Da Figura 2.7, onde a diferença de temperatura é dada em μV , observa-se que nos picos (a) e (b) é onde ocorrem reações endotérmicas e exotérmicas, respectivamente, a aproximadamente 130 °C e 900 °C. O primeiro pico (a) deve-se a perda de água e o segundo (b) a uma mudança de fase, que transforma o gesso em um material de endurecimento mais lento e insolúvel, denominado por Petrucci (1998) de gesso de pavimentação.

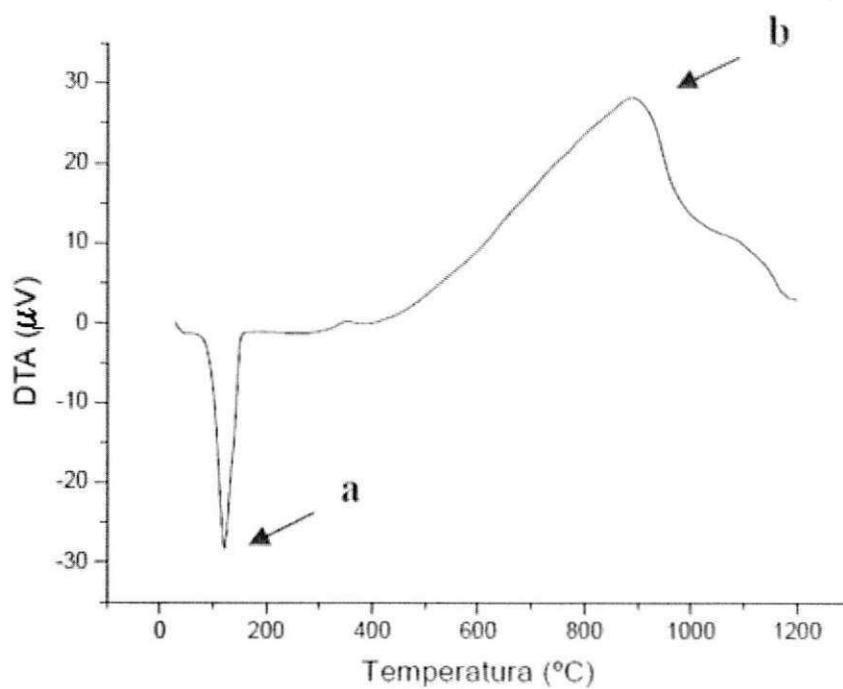


Figura 2.7 – Análise térmica diferencial de rejeito de gesso de construção reciclado (adaptado de SILVA *et al.*, 2006a).

A Figura 2.8 mostra o resultado de uma microscopia eletrônica de varredura em amostras de resíduo de gesso, onde se percebe as partículas maiores em forma prismática alongada e clivada, enquanto que as partículas menores têm formas de prismas cúbicos.

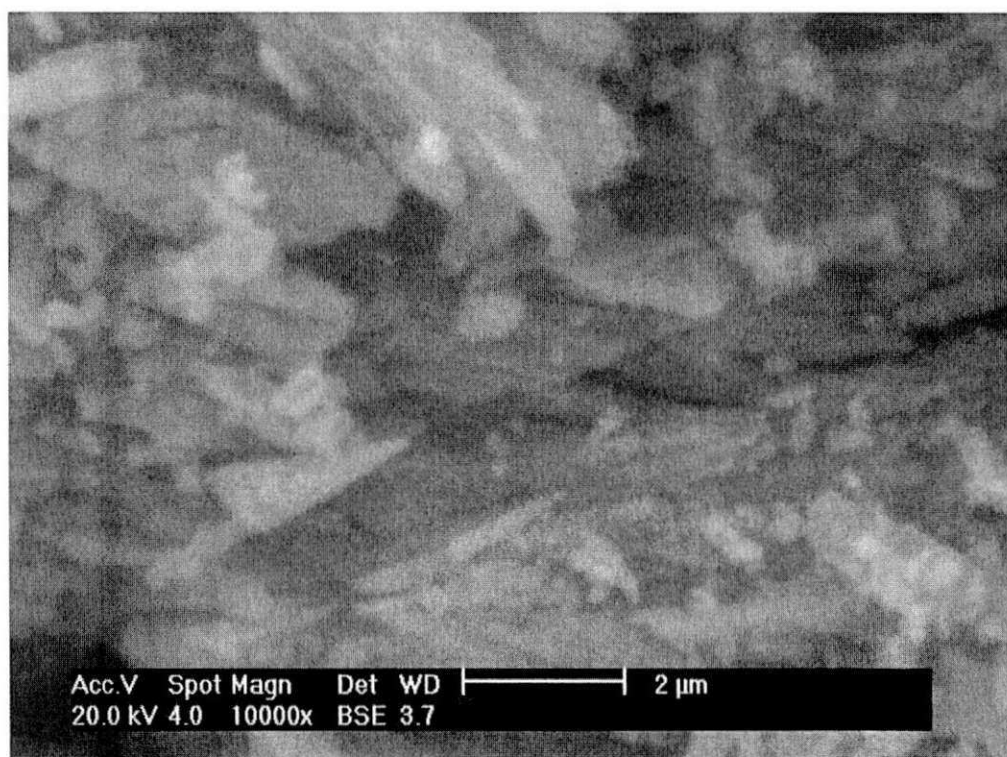


Figura 2.8 – Micrografia Eletrônica de Varredura de rejeito de gesso reciclado (adaptado de SILVA *et al.*, 2006a).

2.3. Pavimentos rodoviários

O transporte no Brasil ainda tem a característica de ser predominantemente rodoviário, ao contrário de outros países mais desenvolvidos, como os Estados Unidos, onde a participação dos diferentes modais de transporte de carga é mais equilibrada (Figura 2.9). Além disso, há desequilíbrio também na distribuição da malha rodoviária entre as regiões do país. Na Tabela 2.5 apresenta-se a extensão da rede rodoviária planejada, em obras, não pavimentadas e pavimentadas, separada por jurisdição, onde se percebe a concentração de rodovias sob jurisdição dos municípios, e conseqüentemente nas regiões metropolitanas.

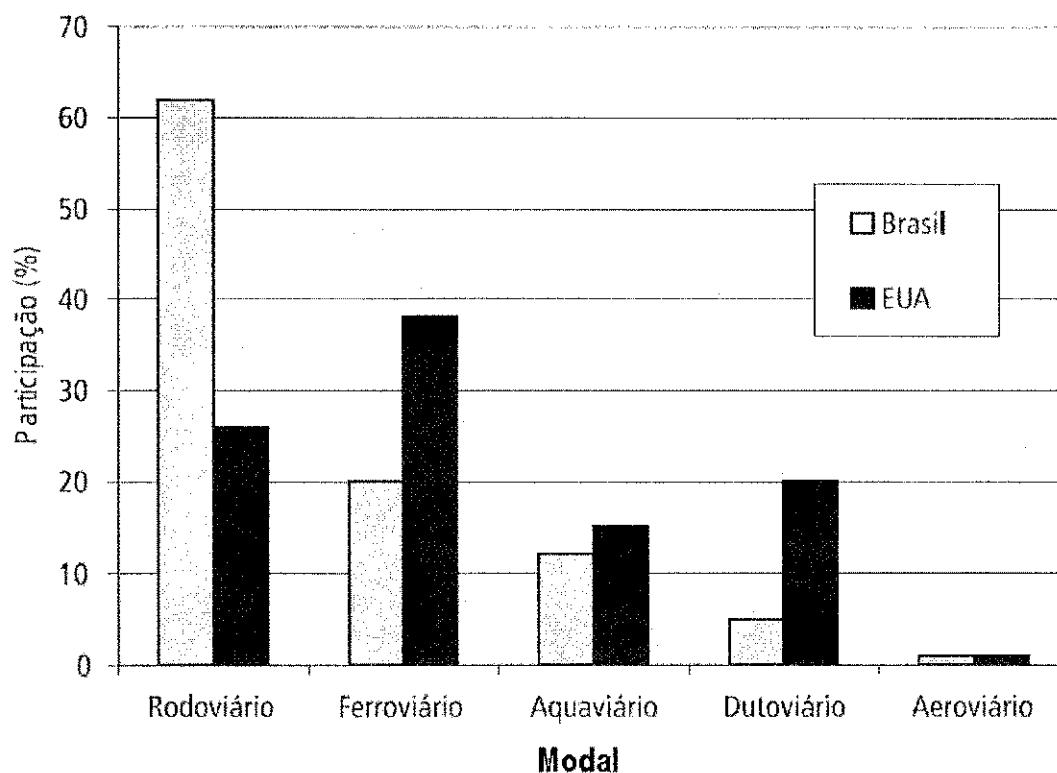


Figura 2.9 – Distribuição da matriz de transportes de carga do Brasil e dos Estados Unidos da América (adaptado de BRASIL, 2006).

Este atual cenário requer, por parte dos municípios, a disponibilidade crescente de recursos para investimentos em construção, restauração e manutenção dos pavimentos rodoviários, pois a melhoria ou manutenção dos indicadores econômico-sociais dependem desse modal de transporte.

Tabela 2.5 – Distribuição das rodovias municipais, estaduais e federais em quilômetros (BRASIL, 2010).

REGIÃO	JURISDIÇÃO		
	MUNICIPAL	ESTADUAL	FEDERAL
NORTE	84.501,90	38.471,80	23.136,60
NORDESTE	333.022,20	79.390,60	31.195,40
SUDESTE	458.165,50	46.708,60	28.362,50
SUL	339.247,60	27.015,40	18.430,40
CENTRO-OESTE	124.189,70	62.550,20	17.637,50
BRASIL	1.339.126,90	254.136,60	118.762,40

O pavimento rodoviário é uma estrutura destinada a suportar os efeitos do clima e das cargas do tráfego de veículos aplicadas na superfície, distribuindo-as no terreno de fundação, constituído por uma ou mais camadas de espessuras finitas, melhorando a segurança, o conforto e a economia dos usuários (BERNUCCI *et al.*, 2006).

De uma forma geral os pavimentos são classificados como:

- Rígido – onde a camada chamada de revestimento tem elevada rigidez em relação às outras camadas e absorve quase totalidade das tensões aplicadas no pavimento. Um exemplo são os pavimentos revestidos com placas de concreto de cimento *Portland*;
- Flexível – todas as camadas sofrem deformação elástica significativa quando submetidas ao carregamento. Como exemplo, os pavimentos com camadas granulares revestidos por camada de concreto asfáltico;
- Semi-rígido – caracterizados pela presença de uma camada intermediária com rigidez mais elevada que as demais, como por exemplo, uma camada de base de solo cimento revestida por uma camada de concreto asfáltico.

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006b) os revestimentos podem ser agrupados de acordo com o esquema apresentado na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Classificação dos revestimentos dos pavimentos rodoviários (DNIT, 2006b).

Revestimento Flexíveis	Betuminosos	Por Penetração	Tratamentos Superficiais Betuminosos	
			Macadames Betuminosos	
	Por Mistura	Na usina	Pré-misturado de graduação tipo aberta Pré-misturado de graduação tipo densa Areia betume Concreto asfáltico <i>Sheet-asphalt</i>	
	Por Calçamento	Alvenaria Poliédrica		
Paralelepípedos		Pedra Betume Cimento Cerâmica		
Revestimentos Rígidos	Concreto Cimento			
	Macadame Cimentado			

O Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ), tema do presente trabalho, é uma mistura asfáltica executada em usina, constituída da composição de agregados minerais e cimento asfáltico, misturada, espalhada e comprimida a quente, com características definidas nas especificações de serviços (PINTO & PREUSSLER, 2002). Essa camada pronta recebe as seguintes designações, dependendo da função:

- Camada de rolamento ou simplesmente capa, que é a camada superior da estrutura destinada a receber diretamente a ação do tráfego e das intempéries. A mistura empregada deve apresentar estabilidade e flexibilidade compatíveis com o funcionamento elástico da estrutura e condições de rugosidade que proporcionem segurança ao tráfego, mesmo sob condições climáticas e geométricas adversas;
- Camada de ligação ou binder, que é a camada posicionada imediatamente abaixo da capa. Apresenta em relação à mistura utilizada para camada de rolamento, diferenças de comportamento, decorrentes do emprego de agregado de maior diâmetro máximo, de maior percentagem de vazios, e menor relação entre betume e vazios;

- Camada de nivelamento ou de regularização, que é o serviço executado com massa asfáltica de graduação fina, com a função de corrigir deformações correntes na superfície de um antigo revestimento e, simultaneamente, promover a selagem de fissuras existentes.

De acordo com o DNIT (2006a), os materiais convencionais constituintes do concreto asfáltico são: agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento ou filer, e ligante asfáltico, os quais devem satisfazer às normas e especificações do órgão.

A produção de CAUQ para as obras correntes da região metropolitana de Aracaju é de responsabilidade da Empresa Municipal de Obras e Urbanização (EMURB), órgão da Prefeitura Municipal de Aracaju. A usina de CAUQ da EMURB está localizada na rodovia SE-065, município de São Cristóvão e tem capacidade de produção diária média atual de aproximadamente 150 toneladas de mistura asfáltica (PMA, 2009). Já a usina do Departamento Estadual de Infra-estrutura Rodoviária de Sergipe (DER/SE), localizada no município de Itabaiana, tem capacidade de produção de aproximadamente 200 t/dia de massa asfáltica (DER SE, 2008).

2.4. Filer em misturas asfálticas

O filer pode ser definido como material que apresenta partículas finamente divididas, originadas da britagem de rochas minerais, moagem de agregados miúdos ou, ainda, através de processos industrializados, que resultem do desenvolvimento de produtos sintéticos, podendo ser constituído de partículas minerais presentes nos agregados graúdos e miúdos que compõem a mistura, ou de outras fontes, que se incorporam aos mástiques e às misturas asfálticas, a fim de melhorar seus desempenhos reológicos, mecânicos, térmicos e de sensibilidade à água, devendo o seu uso obedecer a limites contidos em especificações próprias que visem aperfeiçoar o desempenho das suas funções (SANTANA, 1995).

O DNER (1997a) define material de enchimento, ou filer, como um material mineral inerte em relação aos demais componentes da mistura asfáltica, finamente dividido, passando pelo menos 65% na peneira de 0,075 mm de abertura de malha quadrada. A norma do DNER-EM 367/97 (DNER, 1997a), em vigor atualmente, preconiza os limites para a granulometria do filer de acordo com a Tabela

2.7, enquanto que a norma ASTM D 242-85 (ASTM, 1985) estabelece os limites apresentados na Tabela 2.8.

Tabela 2.7 – Granulometria exigida para o filer pelo DNIT (DNER, 1997a).

Abertura da malha da peneira (mm)	% em peso passando
0,42	100
0,18	95 a 100
0,075	65 a 100

Tabela 2.8 – Granulometria exigida para o filer pela ASTM (ASTM, 1985).

Tamanho da partículas (μm)	% em peso passando
600	100
300	95 a 100
75	75 a 100

Segundo Al-Quadi *et al.* (2009), quando um ligante é combinado com um filer mineral, um mástique é formado. O mástique asfáltico é, portanto, o material formado pela mistura dos finos minerais com o ligante asfáltico. Esse mástique pode ser encarado como um componente da mistura asfáltica que liga os agregados, e como o componente da mistura que sofre deformação quando o pavimento é submetido ao carregamento do tráfego. Portanto, as características do filer podem influenciar significativamente as propriedades do mástique e, conseqüentemente, causar alterações importantes no desempenho da mistura asfáltica. O filer influencia o desempenho mecânico do mástique, física e quimicamente, e, por conseguinte, das misturas asfálticas.

De acordo com Balbo (2007), além de material de enchimento, as adições de filer aos concretos asfálticos, acabam por formar uma massa (CAP + filer) denominada mástique asfáltico. Os fileres adicionados à mistura têm a função de aumentar de viscosidade do CAP, gerando incremento do ponto de amolecimento, da estabilidade, do módulo de resiliência e da resistência, melhorando o desempenho reológico, mecânico, susceptibilidade térmica e sensibilidade à água.

Barra & Momm (2008) defendem que a atividade exercida por um filer na formação de um mástique é física, atuando na rigidez da mistura, e química, interferindo na adesividade, e que isso

independe de sua finura, mas depende da forma, textura, superfície específica e natureza. O comportamento do mástique é regido fisicamente pela forma e textura das partículas, tornando mais rígidas as misturas com teores mais altos de filer, e quimicamente devido à superfície específica e natureza mineralógica, aumentando a adesividade do conjunto mástique-agregado, tanto quanto maior for a superfície específica do filer e a compatibilidade entre cargas elétricas que aumentam o campo de atração molecular.

Para Barra *et al.* (2005) e Barra & Momm (2008), a fração do filer, que tem diâmetro maior que 20 μm , contribui na formação do esqueleto mineral da mistura, preenchendo os vazios entre os agregados graúdos e miúdos, e aderindo aos agregados graúdos, atuando, em vários casos, como melhoradores de adesividade. Por outro lado, a fração com diâmetro menor que 20 μm permanece em suspensão no CAP, denominado filer ativo, responsável por aumentar a viscosidade do ligante, alterando o ponto de amolecimento, diminuindo a susceptibilidade térmica, e aumentando a resistência à deformação.

As propriedades mecânicas da mistura são afetadas pelas propriedades físicas e químicas, graduação e forma dos grãos, e da concentração do filer na mistura (KAVUSSI & HICKS, 1997, *apud* CAVALCANTE & SOARES, 2001). Quanto maior a concentração de filer, mais aproximados estarão os grãos dos agregados, menor será o volume de vazios, e mais rígida a mistura ficará. Segundo Santana (1995), quando a concentração de filer atinge uma quantidade com relação ao CAP, chamada por ele de concentração crítica, a rigidez da mistura passa a comprometer a sua vida de fadiga.

Wesseling *et al.* (2003) estudaram a substituição do filer do pó-de-pedra por cal em uma mistura de concreto asfáltico. Os resultados mostraram que o teor de ligante de projeto diminuiu com a substituição dos fileres, e ainda que a resistência à tração e o módulo de resiliência aumentam.

Vasconcelos (2003) relata que a Avenida Tancredo Neves, importante via urbana de escoamento do tráfego da cidade de Aracaju, que liga a BR-235/SE à Avenida Beira Mar, construída pelo DER/SE de 1971 a 1972 para um período de projeto de 15 anos, teve seu primeiro revestimento em Areia Asfáltica Usinada a Quente (AAUQ), cujo traço era constituído de 51,5% de areia grossa, 37,5% de areia fina, 4% de filer, e 7% de CAP 85-100, com o detalhe de que o filer utilizado foi gesso. O autor registra a primeira restauração realizada em 2001, 29 anos após a construção, e que 60% de uma área de 152.000 m^2 receberam uma camada de reforço de 5 a 6 cm de CAUQ, ou seja, em alguns segmentos, a camada de AAUQ com gesso em sua constituição ainda possuía uma resistência residual que pode ser aproveitada na estrutura restaurada.

2.5. Misturas asfálticas com adição de resíduos

A construção e manutenção de pavimentos consomem grande quantidade de recursos naturais. Por isso, a reciclagem de resíduos nesse tipo de obra de engenharia apresenta-se como uma oportunidade para: reduzir a extração de recursos naturais, diminuir os custos e riscos com a destinação dos resíduos para os aterros ou áreas impróprias, atender necessidades regionais de disponibilidade de materiais, valorizar o rejeito, além de melhorar algumas características mecânicas dos materiais das camadas que formam a estrutura do pavimento. Vários são os pesquisadores que têm abordado essa temática em seus estudos sobre misturas asfálticas, a exemplo do que se registra a seguir.

Os produtos da fresagem de camadas dos pavimentos são potencialmente materiais para reciclagem em rodovias novas ou restauradas, pois podem ser aplicados na sua utilidade inicial ou em outras camadas, como agregados, evitando o despejo desse material, que era considerado inservível, em lugares inadequados ou de alto custo de transporte. Com o advento e modernização da tecnologia de fresagem, a reinserção desse material no próprio pavimento já se tornou uma solução corrente em projetos de manutenção e restauração, já previstos em especificações de serviço como a DNIT – ES 033/2005 (DNIT, 2005a) e DNIT – ES 034/2005 (DNIT, 2005b). Isso é apoiado em estudos como o de Gomes *et al.* (2006), que concluíram que as propriedades mecânicas de misturas que utilizaram a reciclagem não são inferiores às das misturas convencionais.

Outro tema de pesquisa importante é a reciclagem de pneumáticos inservíveis como agregados (processo via seca) ou modificador do ligante (processo via úmida) (PATRIOTA, 2004; PINHEIRO, 2004; SPECHT, 2004). Os pneus quando descartados em áreas inadequadas geram problemas de ordem ambiental e sanitária. No entanto, para Specht *et al.* (2007a; 2007b), a adição de borracha reciclada permite a aplicação de misturas asfálticas em uma amplitude maior de temperaturas ou sob condições mais severas de tráfego, aumenta a resistência à fadiga e à deformação plástica. Segundo Marques & da Paz (2007), que apresentam alguns processos para a reciclagem de pneus, a utilização na fabricação de asfaltos modificados, em comparação aos outros processos de reciclagem, é ainda bastante modesta. Porém, seu emprego vem crescendo em escala mundial e nacional, onde, em curto prazo, tende a se tornar a forma de destinação de maior interesse tanto comercial como ambiental para este resíduo. Em dezembro de 2008, a ANP publicou a Resolução nº 39 que estabelece as

especificações dos CAP modificados por borracha moída de pneus, designados asfalto borracha, comercializados no país (ANP, 2008).

Sachet *et al.* (2009) e Mugayar *et al.* (2009) apresentaram resultados da aplicação de, respectivamente, uso de fresado asfáltico e borracha moída de pneus, em concreto compactado com rolo para pavimentação. Nos dois estudos, a adição do fresado em quantidades crescentes diminuiu características como resistência a tração e módulo de elasticidade, portanto, a adoção dessa solução requer adequação a cada caso.

Bonet (2002) analisou a viabilidade técnica do reaproveitamento do resíduo areia de fundição em misturas asfálticas do tipo CAUQ. Os resultados mostraram que misturas com a adição de 8% de resíduo areia de fundição atendem aos requisitos da especificação em vigor à época e que o resíduo foi totalmente envolvido pela massa asfáltica. Costa *et al.* (2008) apresentaram estudo sobre as características mecânicas de concreto asfáltico com adição de areia de fundição e sobre uma pista experimental construída com a aplicação do resíduo, e concluíram que as misturas com areia de fundição assumiram características mecânicas semelhantes às mistura com areia convencional, mas que era necessário a complementação do estudo com os resultados a serem obtidos da pista experimental.

Aldigueri *et al.* (2004), Lucena (2008) e Onofre *et al.* (2009) estudaram recentemente resíduos da exploração do petróleo, como solo contaminado por vazamentos durante o transporte do óleo e cascalho contaminado de perfuração de poços, e a aplicação destes em misturas asfálticas. Aldigueri *et al.* (2004) e Onofre *et al.* (2009), que trabalharam, respectivamente, com CAUQ e Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ), verificaram que o incremento crescente de solo contaminado à mistura diminuiu o MR e a RT, mas avaliam que há potencial para a aplicação de solo contaminado por petróleo, em determinados teores, na camada de revestimento de pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego e que essa aplicação justifica-se pelos problemas ambientais ligados ao solo contaminado. Lucena (2008), que avaliou a utilização de cascalhos de perfuração oriundos das atividades de exploração de petróleo em revestimentos asfálticos de pavimentos, indicou a possibilidade de utilização deste resíduo em teores da ordem de 4 a 5%, com a melhoria de características mecânicas, como estabilidade e resistência a tração, para as misturas estudadas, sem que esta aplicação represente risco ao meio ambiente.

Fernandes *et al.* (2008) e Lucena (2009) estudaram a adição em misturas asfálticas de resíduos de serragem de granito para uso ornamental e do processamento do caulim, mineral que é empregado

na produção de tintas, plásticos, borrachas, etc. Os dois materiais possuem distribuição dos tamanhos das partículas semelhantes. Em seus estudos, os pesquisadores variaram teores dos resíduos, e verificaram que características das misturas como: estabilidade Marshall, resistência à tração e dano por umidade induzida atenderam as normas vigentes, e que o módulo de resiliência concorda com valores encontrados na literatura. Os autores concluíram pela aplicabilidade dos resíduos.

Castelo Branco (2004) tratou da caracterização de misturas asfálticas com utilização de escória de aciaria, sub-produto da indústria siderúrgica, como agregado em CAUQ. Na pesquisa, a autora constatou a possibilidade de uso deste resíduo, requerendo adequações na metodologia de dosagem e do processo de armazenagem na siderúrgica devido à natureza, heterogeneidade, e expansibilidade do rejeito. Já Mendonça *et al.* (2008) monitoraram vias rurais de acesso à sítios, ou seja, trechos com baixo volume de tráfego, construídos com a utilização de escória de aciaria como revestimento primário e concluíram pela viabilidade técnica e econômica da solução.

Vale (2007) e Vale *et al.* (2007) estudaram as misturas asfálticas tipo *Stone Matrix Asphalt (SMA)* e a substituição de fibras de celulose por fibras de coco verde, que é um resíduo comum na região nordeste, e verificou que as misturas com fibra do resíduo atenderam às especificações, sem prejuízo das características mecânicas, quando comparadas às misturas com fibras de celulose ou sem fibra.

Lucena *et al.* (2008) estudaram o resíduo de material vítreo como filer em concreto asfáltico. A partir de resultados de estabilidade e fluência Marshall e de resistência à tração por compressão diametral, os autores concluíram que misturas com 4 a 5% de vidro, em peso, atendem aos requisitos da especificação de concreto asfáltico do DNIT.

Leal *et al.* (2006) propõem a utilização em CAUQ de polietileno tereftalato, conhecido como PET, muito utilizado na embalagem de alimentos e bebidas. De acordo com a avaliação feita por esses autores, a adição do resíduo diminui a RT e o MR, quando comparado com misturas que não receberam o PET, no entanto é possível a aplicação em teores menores que 4%, sem perdas significativas das características mecânicas.

Devido à escassez de material pétreo na região norte do país, vários pesquisadores trataram de estudar a aplicabilidade em misturas asfálticas de agregados de argila calcinada (FROTA *et al.*, 2003c; SILVA *et al.*, 2006b; CAMPOS, 2008), que apesar de não ser um rejeito, é um material não convencional. Cabral & Vieira (2006) trataram de registrar a metodologia de produção da argila calcinada para a utilização em pavimentação e concluíram pela viabilidade econômica da utilização desse material quando comparado com a brita, que é um agregado escasso na região da Amazônia.

Ainda com relação à carência de brita na região amazônica, Moizinho *et al.* (2005) sugerem a utilização de agregado laterítico em substituição à brita para uso em CAUQ, e apresentam um histórico de aplicações e pesquisas que trataram desse assunto. No estudo realizado, também concluíram pela viabilidade da utilização desse material. Paiva *et al.* (2007) propuseram o emprego de resíduo cerâmico de um pólo oleiro da região como filer em CAUQ em substituição ao cimento *Portland*, que é um material de maior custo, e avaliaram: estabilidade e fluência Marshall, a densidade e o volume de vazios das misturas. Concluiu-se que a mistura com substituição de 30% de cimento pelo resíduo apresentou os melhores resultados de estabilidade e fluência, entretanto, os autores ressaltam que outras características mecânicas devem ser avaliadas, de forma que as implicações do acréscimo do material possam ser conhecidas.

Frota *et al.* (2003b) estudaram um rejeito que tem sido depositado no aterro controlado do município de Manaus, oriundo de fábricas de gás acetileno, a cal de carbureto, que é um material fino com propriedades cimentantes, como alternativa ao cimento *Portland* na condição de filer. Foram estudadas misturas com seixo e areia, materiais comumente utilizados como agregados na região, e outras misturas com RCD. A mistura com RCD e cal de carbureto apresentou maior teor de ligante de projeto, no entanto, melhores valores de estabilidade que as misturas com seixo e areia. Da pesquisa, se concluiu, que a cal de carbureto pode substituir o cimento sem comprometimento das características mecânicas.

Várias pesquisas vem sendo desenvolvidas para avaliar a viabilidade da utilização de RCD em camadas de pavimentos (MOTTA & FERNANDES, 2003; FROTA *et al.*, 2003a e 2005; CAVALCANTE *et al.*, 2006; MACÊDO *et al.*, 2008; NÓBREGA & MELO, 2009; MELO, 2010). No entanto, no que se refere à aplicação em revestimentos faz-se necessário o aprofundamento dos estudos, visto que problemas relacionados à porosidade do resíduo elevam o consumo de CAP, ou requerem modificadores que alterem a viscosidade do ligante (DIAS & SANTANNA-GRECO, 2009).

As pesquisas que tratam do RCD, ao se utilizarem da legislação ambiental em vigor, acabam por excluir a participação do resíduo de gesso na mistura asfáltica como alternativa para sua destinação. Além disso, algumas publicações apenas citam a pavimentação como uma das aplicações do gesso, a exemplo de Petrucci (1998) e DNPM (2009), corroborando o fato de que, nessa fase de pesquisa bibliográfica, não foi encontrada qualquer publicação que tratasse das influências desse material nas características mecânicas das misturas asfálticas. Porém, há que se verificar se a adição do resíduo de gesso em misturas asfálticas também se apresenta como uma possibilidade promissora para a reciclagem. Isto se deve à expectativa de que o CAP, ligante da mistura, possa envolver todas as

partículas de gesso, restringindo o contato com água ou outro solvente, o que poderia dissolver e carrear rapidamente o material. Além do benefício ambiental e da possibilidade de absorção do resíduo dentro do próprio ambiente gerador através da pavimentação urbana, o sucesso da pesquisa poderia, por exemplo, permitir a substituição de materiais mais caros que, por vezes, são adicionados como filer ao CAUQ, como o cimento *Portland* ou a cal.

2.6. Métodos de dosagem do concreto asfáltico

A dosagem de uma mistura de concreto asfáltico é um processo pelo qual se busca uma composição granulométrica de agregados de características específicas com a adição de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Depois de misturados e compactados à temperatura adequada, o material deve oferecer condições mecânicas adequadas para suportar as cargas que solicitam um dado pavimento e as condições climáticas locais, durante sua vida útil. Os objetivos da dosagem de uma mistura asfáltica são: obter uma mistura adequadamente trabalhável na produção, lançamento e compactação, estável sob ação de cargas estáticas ou móveis, durável, com teor de ligante adequado, que garanta boa adesividade e impeça a desagregação e a infiltração da água, que possua níveis adequados de ruído, que tenha baixa deformação permanente e pouca suscetibilidade à fissuração por fadiga ao longo de sua vida de serventia, e que possua vazios preenchidos com ar suficientes e não excessivos, adequada textura superficial, fácil manutenção e economicamente viável (BALBO, 2007).

Para Wesseling (2005), dentre os principais métodos de dosagem de misturas asfálticas do tipo CAUQ, estão o método Marshall e o método *Superior Performing Asphalt Pavements* (Superpave). No Brasil, o método de dosagem mais utilizado tem sido o Marshall. Já o Superpave tem sido usado principalmente em pesquisas acadêmicas (BERNUCCI *et al.*, 2006), ainda assim, de forma restrita, uma vez que o Compactador Giratório Superpave (CGS) e os ensaios de caracterização dessa nova metodologia ainda não tiveram seu uso disseminado em todo o país.

2.6.1. Dosagem Marshall

O método de dosagem desenvolvido pelo engenheiro Bruce Marshall, que recebeu seu nome, na década de 1940, por ocasião da 2ª guerra mundial, para o Corpo de Engenheiros dos EUA, desde a década de 1960, ainda é o método mais utilizado no Brasil para projetos de misturas do tipo CAUQ. Era baseado nas propriedades volumétricas da mistura, além de medidas de estabilidade e fluência Marshall. A norma brasileira para este método permite a adoção de diferentes critérios para determinação do teor de ligante de projeto (ABNT, 1993), no entanto, atualmente o teor de ligante de projeto na dosagem Marshall para misturas a quente é determinado através de parâmetros volumétricos, geralmente volume de vazios e relação betume/vazios (VASCONCELOS, 2004; VASCONCELOS & SOARES, 2009).

A moldagem dos corpos-de-prova na metodologia Marshall é realizada por impacto (golpes) de um compactador que pode ser manual ou automatizado, sendo que este último garante maior uniformidade nos resultados pela manutenção da frequência e da direção de aplicação dos golpes.

Apesar de a metodologia Marshall ser contestada por alguns autores, em virtude da dispersão de seus resultados, principalmente nos valores de estabilidade e fluência, e do confinamento do corpo-de-prova na determinação da estabilidade, que não representa modos de ruptura da mistura no campo, e da forma de compactação, que não é a mesma do campo, a dosagem Marshall é um dos procedimentos mais utilizados para dosagem e controle de qualidade das misturas asfálticas no Brasil, fazendo inclusive parte da atual especificação de concretos asfálticos (DNIT, 2006a), devido à sua simplicidade e baixo custo dos equipamentos.

2.6.2. Dosagem Superpave

Superpave é um produto do *Strategic Highway Research Program (SHRP)*, que foi um programa de pesquisa, o qual durou de 1987 à 1992, e pretendia melhorar o desempenho, durabilidade, segurança e eficiência das estradas americanas. No que diz respeito à parte da pesquisa que tratou de misturas asfálticas, essa teve como um de seus objetivos desenvolver um novo método para projetos

de misturas asfálticas quentes baseado em conceitos mecanísticos, levando em conta características dos materiais, clima e tráfego (HUANG, 2004).

A dosagem Superpave é caracterizada pela forma de compactação por amassamento, que é realizada com o auxílio do Compactador Giratório Superpave (CGS), o qual tem a função de orientar as partículas no corpo-de-prova de forma semelhante ao que acontece na compactação no campo; pela adoção de novos ensaios de caracterização dos materiais; pela forma de escolha da granulometria da mistura que institui pontos de controle e uma zona de restrição na curva granulométrica; e de ensaios complementares com o Analisador de Cisalhamento Superpave (Superpave Shear Tester - SST) e o Analisador de Tração Indireta (Indirect Tensile Tester – ITT), os quais são testes de predição de desempenho, cuja adoção dependerá do nível do projeto, o qual está relacionado ao tráfego.

Esse método tem sido testado em centros de pesquisa no Brasil. Consiste basicamente em estimar um teor provável de projeto através da fixação do volume de vazios e do conhecimento da granulometria dos agregados. O critério de dosagem Superpave é a definição de uma granulometria e um teor de ligante para a obtenção de uma mistura com 4% de volume de vazios (Vv) para um determinado número de giros no compactador, e que atenda os limites de vazios do agregado mineral (VAM) e da relação betume vazios (RBV). Na Figura 2.10, mostra-se um esquema do CGS e do detalhe do molde e das condições que o corpo-de-prova é submetido durante a moldagem.

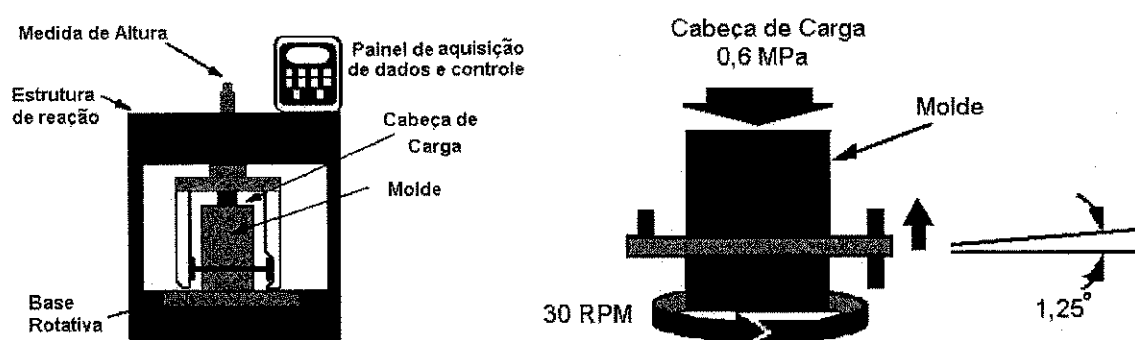


Figura 2.10 – Esquema de um CGS (adaptado de Motta *et al.*, 1996, *apud* Marques, 2004).

Vasconcelos *et al.* (2009) concluíram que à medida que se diminui o tamanho dos agregados, a distribuição destes tende a ser mais uniforme, sem diferença significativa entre os métodos de dosagem Marshall e Superpave. Segundo Marques (2004), o teor de ligante de projeto obtido pela

metodologia Marshall é maior que pela metodologia Superpave, e as características mecânicas são sensíveis ao nível de tensão de compactação na metodologia Superpave.

2.7. Características mecânicas das misturas asfálticas

Quando o pavimento é submetido às cargas do tráfego e efeitos climáticos, ocorre um processo contínuo de degradação, funcional e estrutural. O pavimento é avaliado a partir do seu desempenho no atendimento das necessidades dos seus usuários. O conceito de desempenho funcional de uma rodovia está ligado ao conforto ao rolamento, custo de transporte, segurança do usuário e influência no meio ambiente. Já a capacidade de resistir a esforços e deformações, oriundos do carregamento e do clima, e que interferirá, também, no surgimento de defeitos que comprometem o desempenho funcional, dependerá do desempenho estrutural do pavimento.

Os defeitos que surgem nos revestimentos asfálticos de pavimentos, e que são considerados no cálculo do indicador de desempenho funcional da norma brasileira que trata do assunto são: as fendas, afundamentos, ondulações ou corrugações, exsudação, desgaste, panela ou buraco e o remendo (DNIT, 2003). Além desses, outros defeitos podem estar presentes e podem ser detectados, como por exemplo: falha do bico espargidor nas camadas de imprimção, na última camada granular ou na ligação entre o binder e a capa; polimento dos agregados; bombeamento de finos; desnível entre pista e acostamento; marcas na superfície; e elevações provocadas por raízes de árvore (Bernucci *et al.*, 2006).

Faz-se necessária, portanto, a previsão do desempenho das misturas asfálticas em campo, tanto para subsidiar o dimensionamento das camadas do pavimento, quanto para garantir a integridade do revestimento durante sua vida de serviço. Apesar da caracterização em laboratório ser uma tarefa complexa, devido à dependência de fatores como: variáveis da execução dos serviços em campo, e o histórico do carregamento e da ação do clima durante a vida de serviço, a análise estrutural dos pavimentos, que também é subsidiada por ensaios laboratoriais de caracterização mecânica, compara seus resultados com critérios predefinidos a fim de evitar o surgimento de defeitos (BERNUCCI *et al.*, 2006). A seguir são descritos os ensaios mecânicos utilizados na caracterização das misturas asfálticas analisadas nesta pesquisa.

2.7.1. Resistência à tração

Resistência é a medida do esforço solicitante, registrado sobre o material no instante da ruptura (BALBO, 2007). O ensaio de resistência a tração por compressão diametral, ou tração indireta, conhecido internacionalmente como “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido por Lobo Carneiro, ex-professor da Universidade Federal do Rio de Janeiro, em 1943, para determinar a resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento *Portland* através de solicitação estática. Esse indicador tem sido usado nas especificações de CAUQ dos órgãos rodoviários brasileiros (DNIT, 2006a) e para verificação da resistência à tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico no dimensionamento empírico-mecanístico de pavimentos. Cabe ressaltar que, com o envelhecimento do revestimento, as misturas asfálticas aumentam sua RT, no entanto, mas perdem flexibilidade, diminuindo sua resistência à fadiga (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A resistência à tração por compressão diametral é determinada através do método DNER-ME 138/94 (DNER, 1994e). Este ensaio é realizado em CPs cilíndricos, moldados em laboratório ou extraídos do campo, e consiste na aplicação de uma carga de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes, através de frisos de carga curvos, com 1,27 cm de largura, em posições diametralmente opostas do CP, a temperatura definida.

O esforço que o CP é submetido gera uma tensão de tração, perpendicular à direção da aplicação da força e da maior direção do friso que distribui a carga no CP, ou seja, gera um estado de tensões biaxial, sendo de compressão na direção vertical e de tração na horizontal (Figura 2.11). A forma de ruptura e o esquema de carregamento são mostrados na Figura 2.12. A resistência à tração é determinada a partir da Equação 2.2.

$$RT = \frac{2F}{100\pi Dh} \quad (2.2)$$

Onde: RT: resistência à tração (MPa);

F: carga de ruptura (N);

D: diâmetro do CP (cm);

h: altura do CP (cm).

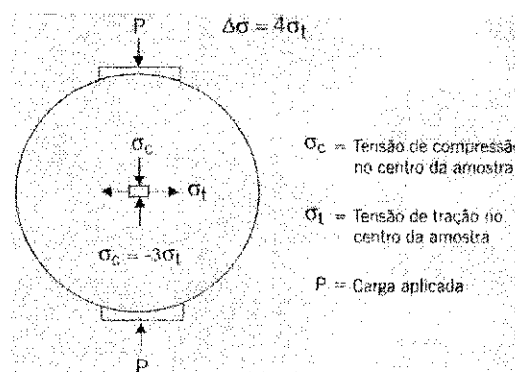


Figura 2.11 – Representação das tensões no centro da amostra de um CP cilíndrico (adaptado de BERNUCCI *et al.*, 2006).

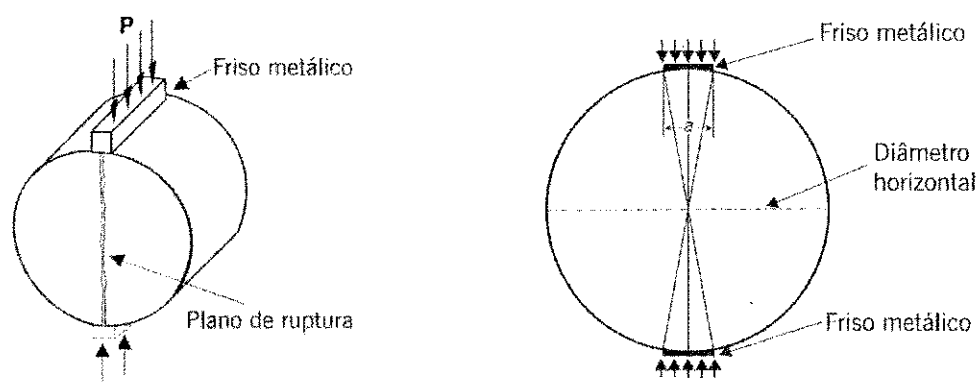


Figura 2.12 – Esquema do ensaio de compressão diametral (adaptado de BERNUCCI *et al.*, 2006).

2.7.2. Resiliência

Resiliência é definida como a energia armazenada por um corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações. Em mecânica dos pavimentos, o termo resiliente é usado para expressar a resposta dinâmica dos materiais submetidos a carregamentos repetidos, pulsantes, na componente elástica da deformação do material que não é necessariamente linear (MOTTA, 1991).

O Módulo de Resiliência (MR) é um dos parâmetros fundamentais para o dimensionamento empírico-mecânico de pavimentos, sejam eles rígidos, semi-rígidos ou flexíveis. Esta característica é determinada para cada camada do pavimento. Para os revestimentos e camadas rígidas ou semi-rígidas, o MR é considerado constante. Nas camadas granulares de base, sub-base, reforço de subleito e subleito, o valor do MR varia com o estado de tensões que o ponto avaliado está submetido, devido à profundidade e tráfego.

O MR é a relação entre tensão (σ) e deformação (ϵ), determinadas em um ensaio de cargas repetidas. Em concretos asfálticos pode ser obtido através de vários tipos de ensaios, sendo os mais comuns (MARQUES, 2004):

- Ensaio de tração uniaxial;
- Ensaio de compressão uniaxial;
- Ensaio de flexão em viga;
- Ensaio de tração diametral indireta;
- Ensaio de compressão triaxial.

No ensaio comumente utilizado no Brasil, o MR de misturas asfálticas é a relação entre a tensão de tração diametral indireta, aplicada repetidamente em um plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica e a deformação específica recuperável, ou resiliente, correspondente a tensão aplicada, numa dada temperatura (MEDINA e MOTTA, 2005). A configuração do ensaio é semelhante ao de RT, porém, aplicando-se um carregamento dinâmico, é possível a determinação do módulo de resiliência (PINTO & PREUSSLER, 2002). MR é, portanto, definido pela Equação 2.3.

$$MR = \frac{\sigma_t}{\epsilon} \quad (2.3)$$

Onde: MR: módulo de resiliência;

σ_t : tensão de tração aplicada diametralmente;

ϵ : deformação elástica ou resiliente.

No plano diametral vertical, a tensão de tração é dada pela Equação 2.4.

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi t d} \left(\frac{d^2 - 4x^2}{d^2 + 4x^2} \right)^2 \quad (2.4)$$

Onde: F: carga aplicada;

t: altura da amostra;

d: diâmetro da amostra;

x: abscissa do ponto considerado.

A deformação específica (ϵ_x), para uma carga concentrada, num ponto x distante do centro do CP cilíndrico é dado pela Equação 2.5. Integrando a equação no intervalo de $(-d/2, +d/2)$, tem-se, para um CP com 10,16 cm de diâmetro, o deslocamento elástico total (Δ) (Equação 2.6) e, daí, o MR pela Equação 2.7 (PINTO & PREUSSLER, 2002).

$$\epsilon_x = \frac{2F}{\pi MRt} \left[\frac{4d^4 - 16d^2x^2}{(d^2 - 4x^2)^2} + (1 - \mu) \right] \quad (2.5)$$

$$\Delta = \int_{-d/2}^{d/2} MRx dx = \frac{F}{MRt} (\mu + 0,2734) \quad (2.6)$$

$$MR = \frac{F}{\Delta t} (\mu + 0,2734) \quad (2.7)$$

Onde: F: carga aplicada;

t: altura da amostra;

d: diâmetro da amostra;

x: abscissa do ponto considerado;

μ : coeficiente de Poisson;

Δ : deslocamento elástico ou resiliente;

Para o carregamento por meio de frisos curvos diametralmente opostos com 1,27 cm, MR é dado pela Equação 2.8 (PREUSSLER, 1983 *apud* PINTO & PREUSSLER, 2002).

$$MR = \frac{F}{\Delta h} \times (0,2692 + 0,9976\mu) \quad (2.8)$$

Onde: MR: módulo de resiliência;

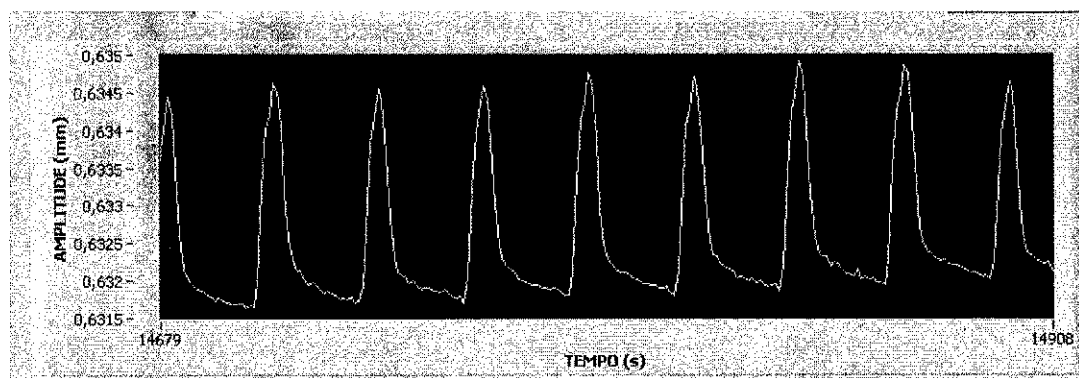
F: carga aplicada;

Δ : deslocamento elástico ou resiliente;

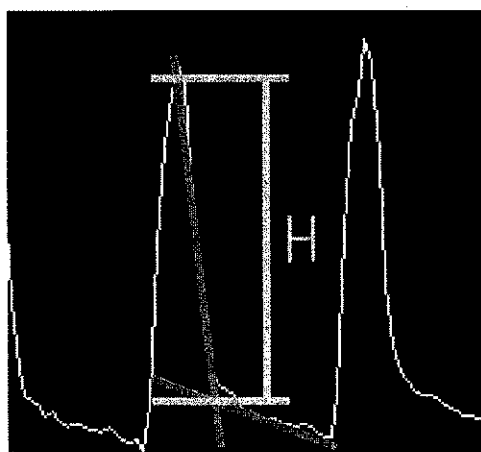
h: altura do corpo-de-prova;

μ : coeficiente de Poisson.

Na Figura 2.13 (a) é possível visualizar os deslocamentos de vários pulsos de carga durante um ensaio, e na Figura 2.13 (b) tem-se o esquema do procedimento convencional para se definir a parcela elástica (H) do deslocamento em cada pulso, como sendo a intercessão de duas tangentes que passam por pontos específicos da curva de deslocamento. Em Bernucci *et al.* (2006) o módulo de resiliência pode ser calculado em função dos deslocamentos instantâneo e total, os quais são obtidos por metodologia específica de análise do pulso de deslocamento, e que a diferença entre esses módulos, a partir dos deslocamentos instantâneo e total, é um indicador da capacidade de recuperação elástica do material quando submetido à ação de cargas.



(a) Exemplo de deslocamento de vários pulsos de carga de um ensaio real no SIEMBS.



(b) Forma de cálculo da deformação elástica por tangentes.

Figura 2.13 – Registro de deslocamento do ensaio de compressão diametral de carga repetida e forma da definição da parcela elástica para cálculo do MR.

Quanto à relação entre módulo de resiliência e resistência a tração, de acordo com Balbo (2007), quanto mais rígido se apresenta um material, maior é sua capacidade de reter esforços em si mesmo, aumentando o efeito de placa da camada. No entanto, isso induz maiores tensões de tração. Alto valor de MR com baixa RT pode comprometer estruturalmente a camada por fadiga. Por isso a mistura deverá ter uma relação MR/RT adequada para que a espessura da camada asfáltica seja suficiente para resistir às tensões de tração em suas fibras inferiores. Portanto, concluir, de forma isolada, que um revestimento é tanto melhor quanto maior for apenas o MR, ou maior o MR/RT, sem levar em consideração as características mecânicas das demais camadas do pavimento, resultará numa avaliação equivocada. Essa correlação entre MR e RT permanece aproximadamente constante com o envelhecimento do revestimento asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2006).

2.7.3. Fadiga

Por conceito, fadiga é “o processo de mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem fissuras que conduzem para totalizar a falha após determinado número de ciclos” (ASTM, 1979, *apud* BERNUCCI *et al.*, 2006). As tensões de tração nas camadas de revestimento asfáltico em estruturas de pavimento flexíveis, provocadas pelo carregamento do tráfego, desencadeiam o processo de fadiga.

O trincamento do revestimento asfáltico por fadiga, ou seja, a repetição das pequenas deformações elásticas e acúmulo de deformações plásticas, é um dos defeitos mais comuns observados nos pavimentos que utilizam o CAUQ. Pinto (1991) registrou que a fadiga é um processo de deterioração estrutural que sofre um material quando submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas, resultando em trincas ou fratura completa, após um número suficiente de repetições de carregamento que causam pequenas deformações elásticas, ou seja, é a perda de resistência que o material sofre, quando solicitado repetidamente por uma carga.

As trincas podem ser isoladas (transversais ou longitudinais) ou interligadas, comumente denominadas couro de jacaré (Figura 2.14). Através das trincas, durante ou após o período de chuvas, pode haver o bombeamento de finos (argila e silte), os quais são levados à superfície pela água. A consequência desse bombeamento é o aparecimento de recalques diferenciais no pavimento e, por conseguinte, a formação de novas trincas (SILVA, 2005).



(a) Trincas longitudinais.



(b) Trincas tipo couro de jacaré.

Figura 2.14 – Trincas em revestimentos asfálticos provocadas por fadiga (adaptado de BERNUCCI *et al.*, 2006).

De acordo com Pinto (1991) os principais fatores que influenciam a vida de fadiga de misturas betuminosas relacionados à carga são: magnitude do carregamento, tipo de carregamento (tensão ou deformação controlada), frequência do carregamento, história das tensões, e forma de carregamento (circular, triangular, quadrada, etc.); já os relacionados à mistura são: tipo, forma e textura do agregado, tipo e teor de ligante, módulo de resiliência e volume de vazios; e os relacionados ao ambiente são: temperatura e umidade. Na Tabela 2.9 mostra-se como se dá essa relação entre alguns dos fatores que interferem na vida de fadiga.

Tabela 2.9 – Fatores que afetam a rigidez e o comportamento à fadiga de concretos asfálticos (Adaptado de PINTO,1991).

Fator	Variação do fator	Efeito da variação do fator		
		Na rigidez	Na vida de fadiga em tensão controlada	Na vida de fadiga em deformação controlada
Penetração do CAP	Decresce	Aumenta	Aumenta	Decresce
Teor de ligante	Aumenta	Aumenta*	Aumenta*	Aumenta**
Tipo de agregado	Aumenta a rugosidade e a angularidade	Aumenta	Aumenta	Decresce
Granulometria do agregado	Aberta e densa	Aumenta	Aumenta	Decresce**
Índice de vazios	Decresce	Aumenta	Aumenta	Decresce**
Temperatura	Decresce	Aumenta	Aumenta	Decresce

* Existe um teor "ótimo" para vida de fadiga máxima.

** Poucos estudos.

Existem modelos que tentam representar a vida de fadiga no campo, no entanto, a variabilidade do tráfego, e as interações ambientais que o pavimento realmente estará sujeito são de difícil previsão e, conseqüentemente, a elaboração de um fator laboratório-campo é difícil devido às limitações do próprio ensaio de fadiga. No entanto, é importante o estudo, em laboratório, da característica mecânica de fadiga do revestimento sob tensão ou deformação controlada, pois isso permite uma comparação do potencial de desempenho entre diferentes materiais dosados num projeto de mistura.

Segundo Pinto (1991), apesar de saber-se das solicitações complexas que o tráfego impõe ao pavimento, os ensaios correntes de fadiga adotam condições de solicitação mais simples. Os equipamentos laboratoriais para ensaio de vida de fadiga de misturas asfálticas aplicam carregamentos cíclicos, submetendo o material à tensão controlada, onde a carga é mantida constante e as deformações aumentam durante o ensaio, ou à deformação controlada, onde a carga é diminuída durante o ensaio de forma que mantenha a deformação controlada. Existe ainda um terceiro tipo de ensaio chamado intermediário, menos comum, em que a tensão e a deformação variam no decorrer do ensaio. O Brasil não dispõe de norma para esse ensaio, no entanto é comum a configuração do ensaio com tensão controlada, sendo essa a que foi utilizada nessa pesquisa.

Na Figura 2.15 apresenta-se uma representação esquemática dos três tipos de ensaios e um exemplo dos seus resultados. Observa-se que o ensaio a tensão controlada permite uma avaliação mais conservadora da vida de fadiga, enquanto no ensaio a deformação controlada tem-se uma avaliação menos conservadora.

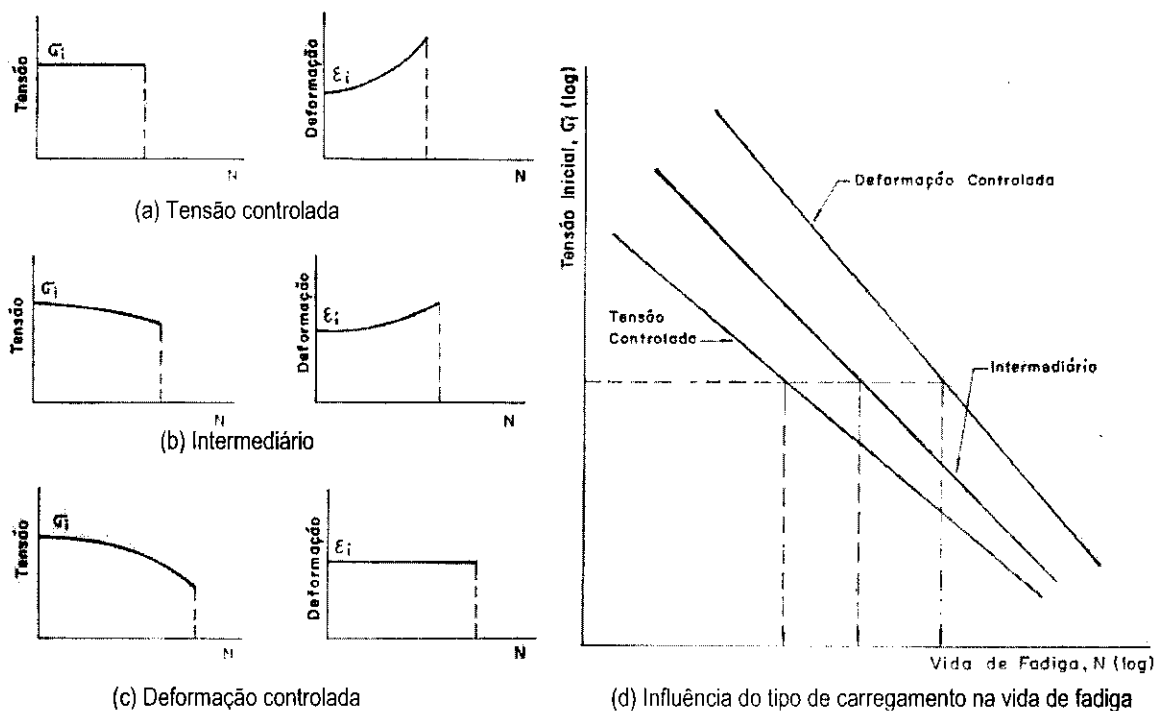


Figura 2.15 – Representação esquemática dos tipos de carregamento e seus efeitos no resultado da vida de fadiga de misturas asfálticas (adaptado de PINTO, 1991).

Segundo Pinto & Preussler (2002), o ensaio com tensão controlada aplica-se a pavimentos com camada asfáltica rígida com relação às camadas subjacentes. Loureiro (2003) estudou a evolução do dano por fadiga, em diferentes misturas asfálticas, no ensaio de compressão diametral à tensão controlada e obteve valores de deformação crítica dos corpos-de-prova que denotariam a ruptura por fadiga. Por isso, sugere que o critério de parada e definição da ruptura do CP no ensaio de fadiga à tensão controlada deve ser o momento em que aparecem as primeiras trincas que são acompanhadas por um decréscimo da rigidez que defina um estado crítico de ruptura.

A vida de fadiga em ensaios com tensão controlada pode ser modelada pelas Equações 2.8 ou 2.9, ou ainda pela Equação 2.10, quando em ensaios à deformação controlada.

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^{n_1} \quad (2.8)$$

$$N_f = K_2 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_2} \quad (2.9)$$

$$N_f = K_3 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{n_3} \quad (2.10)$$

Onde: N_f : vida de fadiga;

σ_t : tensão de tração repetida atuante;

$\Delta\sigma$: diferença entre as tensões de tração e compressão no centro do CP (Figura 2.11);

ε_t : deformação de tração medida no centro do CP;

K_i, n_i : constantes determinadas a partir dos resultados de laboratório.

2.7.4. Desgaste

No revestimento asfáltico, o desgaste, ou desagregação, ocorre após o desprendimento de agregados da superfície, ou ainda da perda de mástique junto aos agregados (Figura 2.16). Esse defeito caracteriza-se pela aspereza superficial anormal. As causas prováveis são a perda de coesão entre agregado e ligante devido à presença de material desconhecido no momento da construção ou presença de água no interior do revestimento que originam uma elevação das pressões hidrostáticas capazes de provocar o descolamento da película betuminosa (BERNUCCI *et al.*, 2006; PINTO & PREUSSLER, 2002).



Figura 2.16 – Descolamento e perda de agregados pela ação do tráfego (adaptado de BERNUCCI *et al.*, 2006).

O ensaio Cântabro, de origem espanhola, permite avaliar o desgaste por efeito da abrasão provocada pelo tráfego nos revestimentos e como parâmetro para a avaliação da coesão, da resistência a abrasão e a degradação de misturas asfálticas. Foi idealizado para misturas drenantes ou porosas. De fácil execução, o ensaio consiste em submeter um CP cilíndrico ao desgaste provocado por 300 rotações do tambor do equipamento de abrasão *Los Angeles* sem as esferas. A relação entre o peso de material que se desprende do CP e o peso inicial do CP, expresso em porcentagem, é o valor do desgaste Cântabro.

2.7.5. Susceptibilidade à água

Além da ação do carregamento provocado pelo tráfego dos veículos, os efeitos do clima, e em especial, o contato com a água e os níveis e variações de temperatura, são agentes importantes no processo de degradação dos pavimentos, e principalmente do revestimento, quanto à aderência entre os materiais que o constituem, afetando o seu desempenho e vida de serviço.

No Brasil, a prática de avaliação da adesividade entre os materiais que constituem a mistura adota ensaios de determinação visual da interação do ligante com os agregados graúdos e miúdos (DNER, 1994a). No entanto, essa forma de avaliação não guarda muita relação com o que, de fato, acontece em campo, podendo fornecer conclusões equivocadas, segundo Furlan (2006), que pesquisou a perda de adesão de misturas asfálticas densas por ação da água através de algumas propriedades mecânicas. A avaliação de dano por umidade induzida pode ser utilizada para prever o desempenho de misturas asfálticas em campo, com relação à adesividade entre o ligante e os agregados. Os danos por umidade não caracterizam modos de ruptura, mas, um processo condicionante, acelerado pela presença de água, que pode levar à ruptura por outros defeitos, como: afundamento em trilhas de rodas, trincas por fadiga ou desagregação com evolução para buracos e panelas.

Na Tabela 2.10 são apresentados alguns dos principais métodos de avaliação de dano por umidade em alguma propriedade mecânica, que preveem condicionamento para a mistura.

Tabela 2.10 – Ensaio de avaliação de susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas (adaptado de Furlan, 2006).

Ensaio	Características do corpo-de-prova	Característica de preparo da mistura	Condicionamento	Critério de aceitação
Susceptibilidade térmica (SKOG e ZUBE, 1963)	101 x 61 mm vazado no centro		Saturação a vácuo	
Imersão-compressão (ASTM D1075 e AASHTO T 165)	n = 6 réplicas 101,6 x 101,6 mm Vv = 6%	Cura da mistura: 25 °C	Imersão em água: 40 °C por 4 dias ou 60 °C por 1 dia	Relação de propriedade retida: E > 70%
Lottman (NCHRP 246)	n = 9 réplicas Moldagem Marshall Vv = 6 a 8% ou do campo	Envelhecimento da mistura não compactada a 60 °C por 16 h; Condicionamento de moldagem: 2 h na temperatura de compactação.	Vácuo: 600 mmHg por 30 min; Grau de saturação de 55 a 80% Ciclo térmico: Congelamento: -17 °C por 15 h; Descongelação: 60 °C por 24 h.	Relação de propriedade perdida: RT > 70%
Tunnicliff e Root (1995)	n = 6 réplicas Moldagem Marshall Vv = 6 a 8% ou do campo	Condicionamento de moldagem: 2 h na temperatura de compactação.	Vácuo: 500 mmHg por 5 min; Grau de saturação de 55 a 80% Ciclo térmico: Congelamento: não há; Aquecimento: 60 °C por 24 h.	Relação de propriedade perdida: RT > 70%
ASTM D 4867	n = 6 réplicas Moldagem Marshall Vv = 6 a 8% ou do campo	Condicionamento de moldagem: 2 h na temperatura de compactação.	Vácuo: 500 mmHg por 5 min; Grau de saturação de 55 a 80% Ciclo térmico: Congelamento (opcional): -18 °C por 15 h; Aquecimento: 60 °C por 24 h. Imersão (opcional): 25 °C por 15 min.	Relação de propriedade perdida: RT > 70%
Lottman modificado AASHTO T-283	n = 6 réplicas Moldagem Marshall Vv = 6 a 8% ou do campo	Envelhecimento da mistura não compactada a 60 °C por 16 h; Condicionamento de moldagem: 2 h na temperatura de compactação.	Vácuo: 500 mmHg por 5 min ou até um máximo de 30 min; Grau de saturação de 55 a 80% Ciclo térmico: Congelamento: -18 °C por 16 h; Aquecimento: 60 °C por 24 h. Imersão (opcional): 25 °C por 2 h.	Relação de propriedade perdida: RT > 80%

2.7.6. Deformação permanente

Assim como o trincamento do revestimento asfáltico provocado pela fadiga do material, as deformações permanentes, irreversíveis nas trilhas de rodas figuram entre os principais defeitos da camada superficial (Figura 2.17). O pavimento pode ser considerado como tendo um comportamento visco-elasto-plástico. As deformações da estrutura do pavimento são constituídas de parcelas elásticas, as quais são totalmente recuperáveis, viscosas, que são permanentes e dependem do carregamento e de sua duração, e plásticas, que são permanentes e independem do tempo do carregamento. Assim, os afundamentos de trilhas de rodas são resultantes das propriedades viscosas e plásticas dos materiais que constituem o pavimento (DRESCHER *et al.*, 1993, *apud* COUTINHO NETO & FABBRI, 2004). O estudo das deformações permanentes de misturas asfálticas permite avaliar o potencial de afundamento em trilhas de rodas.

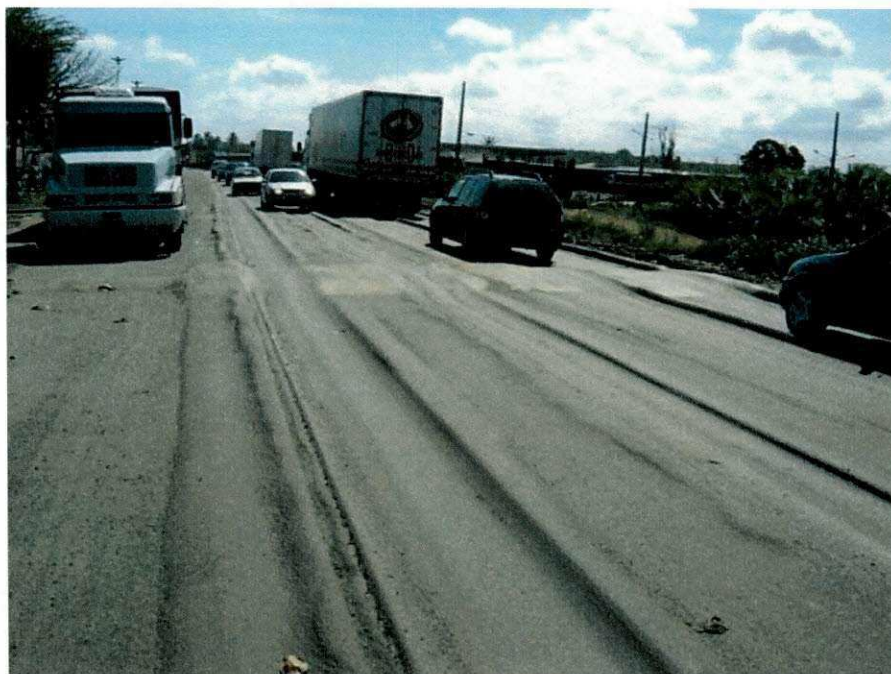


Figura 2.17 – Afundamento em trilhas de rodas.

Segundo Medina & Motta (2005), a resistência à deformação permanente é tanto maior quanto mais grossa é a granulometria e mais consistente for o CAP. Segundo Sá (1996), a deformação permanente de misturas asfálticas é função da temperatura, do nível de tensão, do teor de ligante e da

granulometria, mas, independente da densidade aparente da mistura. Para Monismith (1989) *apud* Specht *et al.* (2007b), os fatores mais importantes que interferem na resistência de uma mistura asfáltica à deformação permanente são: a textura superficial dos agregados, a granulometria da mistura, a rigidez do CAP, o teor de CAP, a sensibilidade à água, e a energia de compactação. O Brasil não dispõe de norma que trate de ensaios de deformação permanente.

Num projeto de mistura asfáltica, a medida do afundamento pode ser feita, em laboratório, através de simuladores de tráfego de laboratório e de ensaios de deformação axial, conhecidos como ensaios de *creep*. A compactidade e a resistência a passagem do tráfego podem ser indiretamente previstas por meio da determinação do Índice de Densificação na Construção (*Construction Densification Index* – CDI) e do Índice de Densificação pelo Tráfego (*Traffic Densification Index* – TDI), obtidos com a utilização do CGS. Já a previsão do afundamento de trilha de roda em campo torna-se difícil diante do impacto das condições ambientais e das solicitações do tráfego durante toda a vida de serviço do pavimento.

O ensaio de deformação por compressão axial estática, ou *creep* estático, tem sido utilizado para estimar a capacidade de misturas asfálticas convencionais de resistirem à deformação permanente sob diferentes condições de temperatura e carregamento. O ensaio de *creep* estático desenvolvido pela Shell prevê a utilização de no mínimo dois corpos-de-prova, que podem ser moldados pelo método Marshall, onde o corpo-de-prova deve ser ensaiado por 3.600 s, à temperatura de 40 °C e com uma tensão de 1 kgf/cm² (COUTINHO NETO & FABBRI, 2004).

Little *et al.* (1993) *apud* Coutinho Neto & Fabbri (2004), que definiram que o ensaio deveria ser realizado por 3600 s, à temperatura de 40 °C, mas, com uma tensão próxima das observadas no campo, ou seja, na faixa de 3,5 a 4,15 kgf/cm², para a maioria dos casos, desenvolveram critérios para identificar o potencial de misturas às deformações permanentes em ensaios de deformação por compressão axial estática. Os quais são: deformação total para uma hora de carregamento, inclinação do estágio secundário da curva deformação em função do tempo de carregamento, em escalas logarítmicas, e o módulo de fluência. Onde, o estágio secundário (trecho de fluência constante) é determinado entre 1000 e 3600 s e o módulo de fluência é a relação entre a tensão no ensaio e a deformação axial específica em determinado instante.

Viana *et al.* (2003) *apud* Bernucci *et al.* (2006) apresentaram uma técnica alternativa para a medida das deformações durante o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, onde, as irregularidades das faces do corpo-de-prova não produzem efeito na medida das deformações, visto

que o registro dos deslocamentos é feito entre pontos localizados ao longo do corpo-de-prova, e não na superfície (Figura 2.18).



Figura 2.18 – Medida da deformação axial ao longo do corpo-de-prova (adaptado de BERNUCCI *et al.*, 2006).

A deformação relativa ao final de uma hora de carregamento pode atingir um estágio avançado de dano, que caracterizaria a mistura como não adequada a resistir às deformações permanentes. Porém, o principal parâmetro obtido no ensaio de *creep* é o comportamento da deformação do CP durante o período do ensaio, que é importante na solução de problemas envolvendo materiais viscoelásticos lineares, como as misturas asfálticas.

Assim, uma análise comparativa de misturas que empreguem um resíduo como o de gesso da construção civil como filler e outra que não o utilize, deve contemplar as implicações de sua adição. Os resultados da caracterização dos materiais, da dosagem e de características mecânicas como: resistência a tração, módulo de resiliência, vida de fadiga, resistência ao desgaste, susceptibilidade à água e resistência à deformação permanente, em laboratório e no campo, são critérios para avaliar a viabilidade técnica da utilização do resíduo em misturas de CAUQ.

CAPÍTULO 3. OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada na fase experimental da pesquisa visando caracterizar os materiais utilizados nas misturas, além das especificações requeridas pelo órgão normativo do setor rodoviário nacional, e dos resultados obtidos nos ensaios dos materiais. No caso do resíduo empregado, foram adotados ensaios específicos para sua caracterização. Os métodos de ensaios utilizados foram os descritos em normas aprovadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), pelo Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT) e pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Na Figura 3.1 apresenta-se um fluxograma com os ensaios realizados.

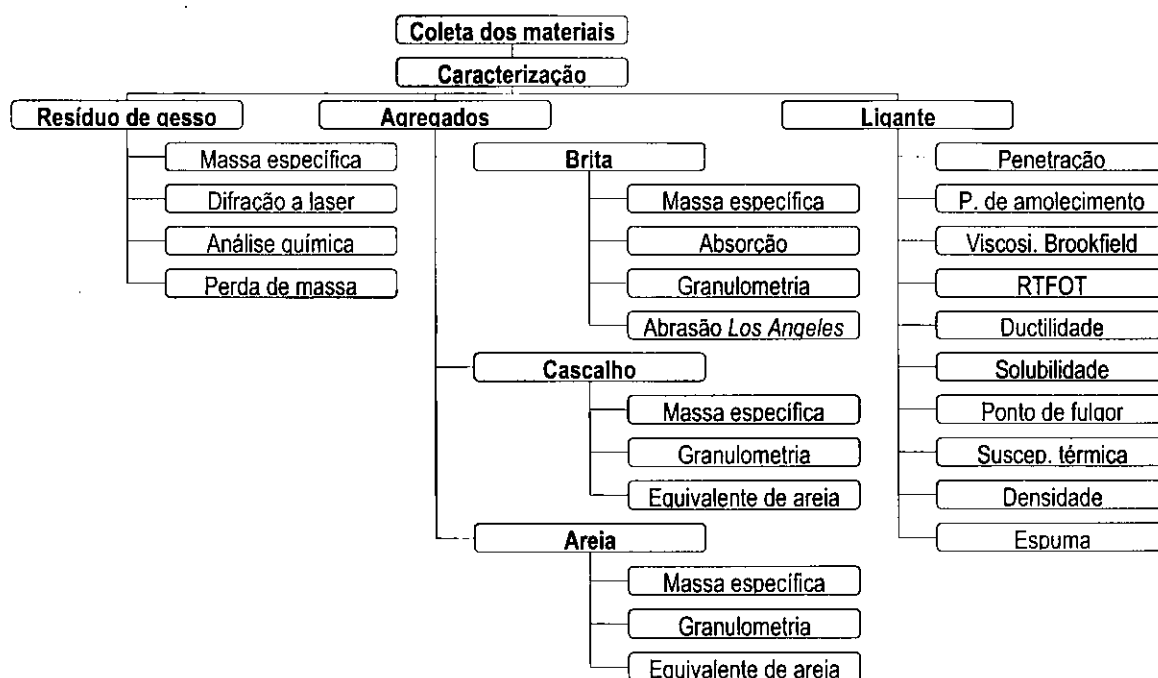


Figura 3.1 – Fluxograma de ensaios de caracterização dos materiais usados nesta pesquisa.

3.1. Obtenção e caracterização física e reológica do ligante

O cimento asfáltico utilizado na pesquisa é classificado como CAP 50-70, produzido pela Refinaria Landulpho Alves (RLAM), localizada no município de São Francisco do Conde, BA, pertencente ao parque de refinarias da empresa Petróleo Brasileiro S/A (Petrobras). De acordo com os

ensaios realizados no laboratório da própria refinaria (Anexo A), cujos resultados estão apresentados na Tabela 3.1, o CAP usado nesta pesquisa atende às especificações brasileiras regulamentadas pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2006). Na Figura 3.2 mostra-se a forma de acondicionamento do CAP para o transporte da refinaria até o laboratório GeoPav/UFS.

Tabela 3.1 – Resultados da caracterização do CAP utilizado na pesquisa.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	CAP 50-70		MÉTODOS	
		LIMITES DA ESPECIFICAÇÃO	CAP 50-70 RLAM	ABNT	ASTM
Penetração (100 g, 5 s, 25 °C)	0,1mm	50 a 70	54	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	46	49,4	NBR 6560	D 36
Viscosidade Brookfield	cP			NBR 15184	D 4402
a 135 °C, SP 21, 20 rpm, mín.		274	397,71		
a 150 °C, SP 21, mín.		112	198,19		
a 177 °C, SP 21		57 a 285	73,4		
Índice de susceptibilidade térmica		(-1,5) a (+0,7)	-1,2		
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	312	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	100	NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25° C, mín.	cm	60	>150	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min					D 2872
Variação em massa, máx.	% massa	0,5	0,15		
Ductilidade a 25° C, mín	cm	20	>150	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	6	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín.	%	55	76	NBR 6576	D 5
Aquecimento a 177 °C (Espuma)			Não Espuma		X 215
Densidade relativa			1,033		D 70



(a) Embalagem para transporte do CAP.



(b) Lata contendo CAP enviado pela refinaria.

Figura 3.2 – Forma de acondicionamento do CAP fornecido pela Petrobras.

3.2. Obtenção e caracterização do resíduo de gesso

O resíduo de gesso utilizado nesta pesquisa foi coletado em uma obra de condomínio residencial em construção na cidade de Aracaju, que se encontrava em fase de acabamento. O resíduo não estava misturado com o bota-fora da obra e não havia sido exposto à chuva. Foram coletados aproximadamente 50 kg de material. Na Figura 3.3 apresenta-se uma parte da amostra do resíduo de gesso obtido na referida obra.



Figura 3.3 – Aspecto do gesso coletado na obra.

Em laboratório, o gesso foi submetido à secagem em estufa (105 °C) e ao desgaste para redução do diâmetro das partículas, empregando-se para isso o aparelho de abrasão *Los Angeles* (Figura 3.4). Detalhes visuais do resíduo, que passa na peneira com abertura de malha quadrada de 4,8 mm, após redução do diâmetro, podem ser percebidos na Figura 3.5. Posteriormente, o gesso foi destorroado com auxílio do almofariz e da mão-de-grau. Para aplicação nas misturas asfálticas estudadas, após esse processo de secagem, redução de diâmetro e destorroamento, o resíduo passou pela peneira de malha quadrada com abertura de 0,075 mm (# 200), atendendo plenamente à especificação em vigor no DNIT para materiais de enchimento ou filler. A textura final do resíduo pronto para aplicação nas misturas pode ser vista na Figura 3.6.

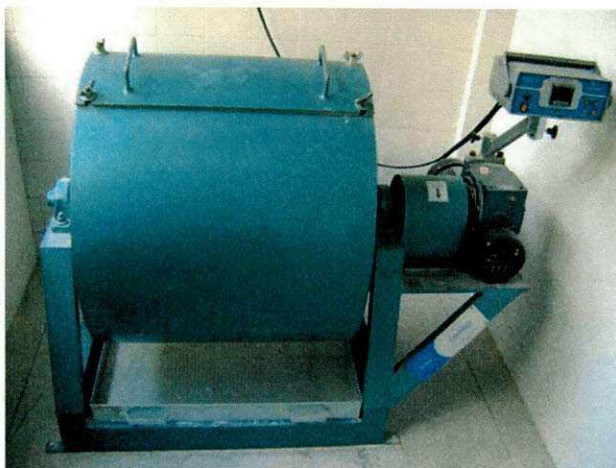


Figura 3.4 – Equipamento de abrasão *Los Angeles* usado na redução do diâmetro do resíduo de gesso.



Figura 3.5 – Resíduo de gesso após redução de diâmetro no aparelho de abrasão *Los Angeles*.



Figura 3.6 – Resíduo de gesso após passar na peneira 0,075 mm (# 200).

3.2.1. Análise química por difração de raio X do resíduo de gesso

Um dos principais empregos do ensaio de difração de raios-X é a determinação da estrutura cristalina e, conseqüentemente, da caracterização mineralógica, que nesta pesquisa foi realizada, em amostras do resíduo de gesso, através de ensaios de fluorescência de raios-X, em um equipamento da marca Shimadzu (EDX-720), pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da UFCG. Tal equipamento consegue detectar elementos na faixa do sódio (Na) até o urânio (U), e fornece um espectro de fluorescência com os picos de energia liberada por cada elemento, os quais são identificados por um programa específico e depois quantificados. Assim, foi possível a determinação da composição química do resíduo de gesso.

Os resultados da análise da composição química de amostras do resíduo de gesso, previamente, submetidas à secagem em estufa (105 °C), e que passaram pela peneira com abertura de 0,075 mm, estão apresentados na Tabela 3.2, podendo ser visualizados graficamente na Figura 3.7. Os dados contidos na tabela e na respectiva figura revelam a presença em alta concentração de óxidos de enxofre (S) e cálcio (Ca), cujos resultados corroboram os encontrados por Silva *et al.* (2006a).

Tabela 3.2 – Composição química (% em massa) da amostra analisada.

Composto químico	Denominação	Percentual na amostra (%)
SO ₃	Trióxido de enxofre	54,95
CaO	Óxido de cálcio (cal)	41,29
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo	2,10
SiO ₂	Dióxido de silício	0,90
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio	0,41
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro III	0,13
K ₂ O	Óxido de potássio	0,11
SrO	Óxido de estrôncio	0,11
Total		100,00

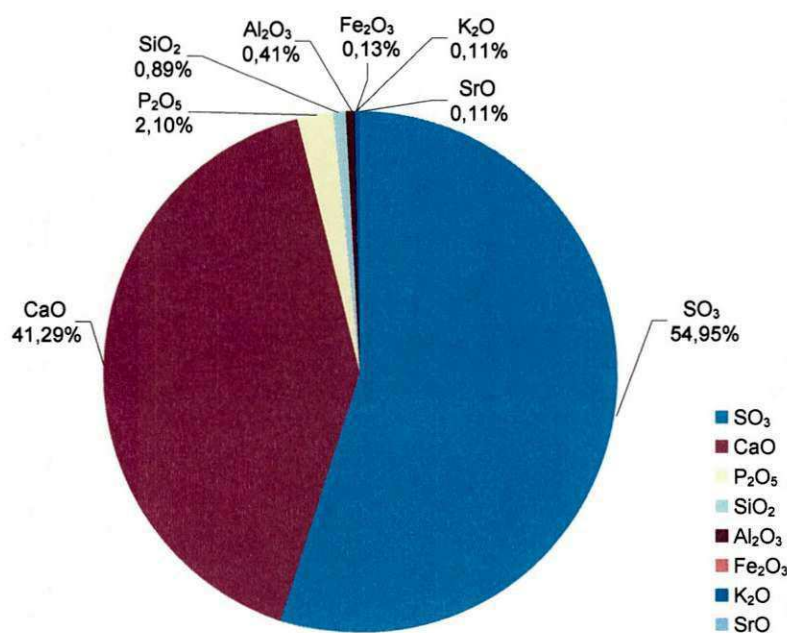


Figura 3.7 – Distribuição da composição química do resíduo de gesso.

3.2.2. Granulometria a laser

A caracterização física do resíduo de gesso, obtida a partir da distribuição dos tamanhos das partículas, foi realizada através do aparelho analisador de partículas por difração a laser da marca CILAS 1064. Esse equipamento, também pertence à Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da UFCG (Anexo B), que, de acordo com Lucena (2008), utiliza o método de dispersão de partículas em fase líquida e um processo de medida óptica por difração a laser. Na Figura 3.8 estão os resultados da amostra ensaiada.

Da Figura 3.8, observa-se que aproximadamente 80% do resíduo têm diâmetro inferior a 20 μm . Portanto, conforme afirma BARRA *et al.* (2005) e BARRA & MOMM (2008), com essa granulometria, há de se esperar um comportamento predominante de fíler ativo, ou seja, o gesso deve alterar a viscosidade do ligante, aumentando sua resistência à deformação, porém, sem melhorias significativas quanto à adesividade.

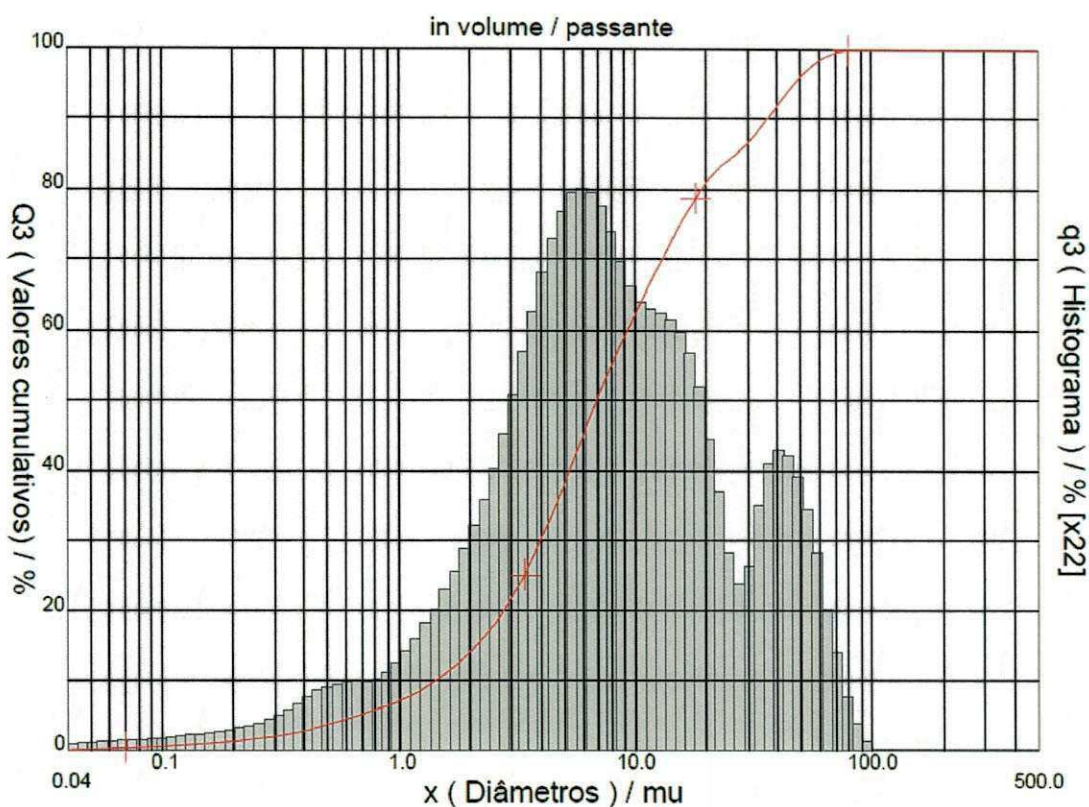


Figura 3.8 – Distribuição dos tamanhos das partículas de resíduo de gesso obtida por difração a laser.

3.2.3. Massa específica real

A massa específica real foi determinada através do método de ensaio DNER-ME 085/94 (DNER, 1994b), o qual consiste na relação entre uma massa de aproximadamente 60 g e o deslocamento da coluna de querosene no frasco *Le Chatelier*. O valor obtido foi de 2,675 g/cm³. O resíduo de gesso não se mostrou solúvel, quando imerso no querosene. Os dados do ensaio estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Valores da massa específica real do resíduo de gesso.

	1ª Determinação	2ª Determinação
Massa de gesso (g)	59,80	60,02
Leitura inicial do frasco Le Chatelier (ml)	0,2	0,5
Leitura final do frasco Le Chatelier (ml)	22,6	22,9
Massa específica real (g/cm ³)	2,670	2,679
Média (g/cm ³)	2,675	

3.2.4. Verificação da perda de massa por secagem

Em consequência da avaliação feita por Silva *et al.* (2006a), os quais observaram uma perda de massa em rejeitos de gesso quando este atinge uma temperatura próxima da que foi adotada para mistura e compactação dos materiais nos CAUQ estudados, nesta pesquisa procedeu-se uma verificação dessa perda com oito amostras do gesso. Para isso, foi determinando a umidade higroscópica do resíduo, de acordo com a norma DNER-ME 213/94 (DNER, 1994f), e a perda de massa por secagem, referente à água de constituição, ou estrutural, submetendo as mesmas amostras à temperatura de 170 °C em estufa por mais 24 horas. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 3.4. O gesso apresentou umidade de 17,8%. No segundo momento (170 °C) a perda foi de 6,15%. Diante da quantidade de gesso na mistura, do procedimento de separação de materiais para moldagem, e dos resultados da análise de perda por secagem, não foi considerada perda de massa do gesso na preparação dos corpos-de-prova que merecesse correção na massa dos materiais, e, conseqüentemente, nos corpos-de-prova, durante as moldagens.

Tabela 3.4 – Verificação da perda de massa por secagem do resíduo de gesso.

UMIDADE HIGROSCÓPICA				
Cápsula	Peso da cápsula (g)	Peso da cáps+gesso (g)	Peso da cáps+gesso (105 °C; 24h) (g)	Teor de Umidade (105 °C; 24h) (%)
101	45,791	82,366	76,831	17,83
108	44,744	97,174	89,242	17,83
110	45,460	109,429	99,763	17,80
135	45,742	115,543	104,989	17,81
143	44,797	108,398	98,766	17,85
149	44,163	114,38	103,773	17,79
155	44,935	112,055	101,907	17,81
161	44,300	107,979	98,356	17,80
Média				17,82
Desvio padrão				0,02
Coeficiente de variação				0,10
VERIFICAÇÃO DA PERDA DE MASSA				
Cápsula	Peso da cápsula (g)	Peso da cáps+gesso (g)	Peso da cáps+gesso (170 °C; 24h) (g)	Perda de massa (170 °C; 24h) (%)
101	45,791	76,831	75,039	6,13
108	44,744	89,242	86,657	6,17
110	45,460	99,763	96,611	6,16
135	45,742	104,989	101,541	6,18
143	44,797	98,766	95,662	6,10
149	44,163	103,773	100,319	6,15
155	44,935	101,907	98,607	6,15
161	44,300	98,356	95,210	6,18
Média				6,15
Desvio padrão				0,03
Coeficiente de variação				0,43

3.3. Obtenção e caracterização dos demais agregados

Os agregados minerais utilizados nesta pesquisa foram coletados segundo a norma DNER-PRO 120/97 (1997d), na usina de concreto asfáltico da Empresa Municipal de Urbanização (EMURB) da Prefeitura Municipal de Aracaju, que está localizada às margens da rodovia SE-065, popularmente conhecida como rodovia João Bebe Água, no município de São Cristóvão. As amostras de brita 12,5 mm, areia e cascalho foram os mesmos materiais utilizados pela EMURB, à época, na produção de CAUQ para pavimentação e manutenção da malha viária municipal e eventualmente de rodovias estaduais, quando em convênio com o Departamento Estadual de Infra-estrutura Rodoviária (DER) do estado de Sergipe. Esses materiais foram coletados em meados de maio de 2009. Uma vista da usina, bem como dos materiais disponíveis à época estão mostrados nas Figuras 3.9 a 3.15.

As amostras dos materiais foram reduzidas em porções menores, segundo a norma DNER-PRO 199/96 (DNER, 1996), para a realização dos ensaios de caracterização e posterior moldagem dos corpos-de-prova de CAUQ utilizados na dosagem e caracterização mecânica das misturas (Figuras 3.16 e 3.17).



Figura 3.9 – Foto da usina de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) da EMURB.



Figura 3.10 – Local de extração das amostras de brita na usina de CAUQ da EMURB.



Figura 3.11 – Local de extração das amostras de areia na usina de CAUQ da EMURB.



Figura 3.12 – Local de extração das amostras de cascalho na usina de CAUQ da EMURB.



Figura 3.13 – Brita de diâmetro máximo 12,5 mm, utilizada na mistura do CAUQ da EMURB.



Figura 3.14 – Areia utilizada na mistura do CAUQ da EMURB.

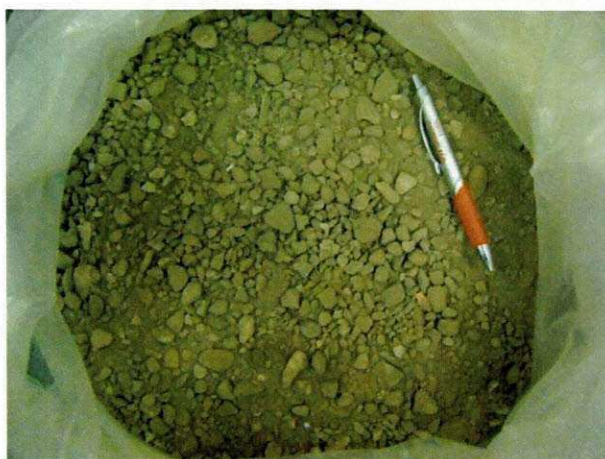


Figura 3.15 – Cascalho utilizado na mistura do CAUQ da EMURB.



Figura 3.16 – Secagem dos agregados ao ar no GEOPAV.



(a)

(b)

Figura 3.17 – Operação de quarteamento dos agregados para preparação de amostras para os ensaios desta pesquisa.

3.3.1. Análise granulométrica

As distribuições granulométricas da brita, da areia e do cascalho foram obtidas de acordo com a norma DNER – ME 083/98 (1998c). Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 3.5 e na Figura 3.18, onde, nesta última, apresentam-se as curvas granulométricas de cada agregado. A dimensão máxima característica da brita e do cascalho é 12,5 mm, da areia é 1,2 mm. O módulo de finura da brita é 5,84, da areia é 1,88 e do cascalho é 4,15. O teor de material pulverulento da brita é 1%, da areia é 2%, e do cascalho é de 10%.

Tabela 3.5 – Granulometria - Porcentagens de materiais passando nas peneiras.

Abertura da peneira de malha quadrada		Material de passando (%)		
(mm)	(Pol / nº)	Brita 12,5 mm	Areia	Cascalho
50,80	2"	100	100	100
38,10	1 1/2"	100	100	100
25,40	1"	100	100	100
19,10	3/4"	100	100	100
12,70	1/2"	96	100	97
9,50	3/8"	75	100	87
4,80	4	24	100	57
2,40	8	5	100	40
2,00	10	5	100	38
1,18	16	4	99	33
0,60	30	3	78	29
0,42	40	3	53	26
0,30	50	3	30	24
0,18	80	2	7	17
0,15	100	2	5	15
0,075	200	1	2	10

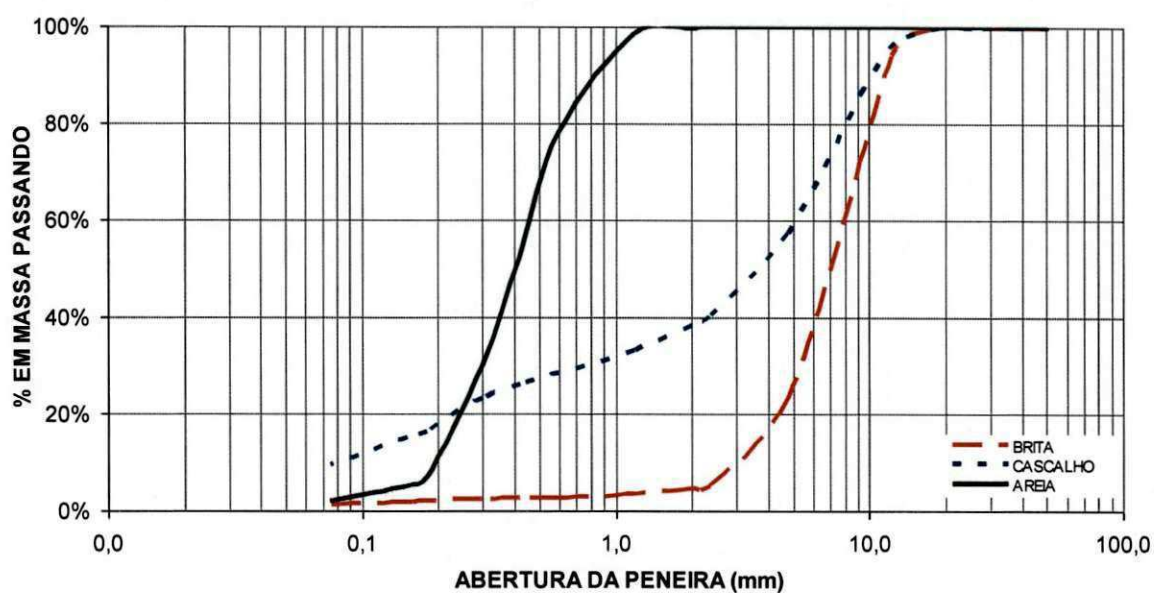


Figura 3.18 – Granulometria da brita, do cascalho e da areia da EMURB.

3.3.2. Desgaste por abrasão *Los Angeles*

O ensaio de abrasão foi realizado com a brita, de acordo a norma DNER – ME 035/98 (DNER, 1998a). Foram realizados ensaios com a graduação “C”, sua respectiva carga abrasiva e número de rotações do tambor, e com uma graduação especial de 5000 g \pm 10 g, preparada apenas com material passante na peneira com abertura da malha quadrada de 12,5 mm e retido na de 9,5 mm, com a carga abrasiva da graduação B, que é de 4.584 g \pm 25 g e 500 rotações do tambor. Essa graduação especial foi também avaliada devido à sua abundância nas amostras de brita. Os resultados da média de duas determinações para cada graduação estão apresentados na Tabela 3.6.

Os resultados obtidos desse ensaio são inferiores ao limite estabelecido pelo DNIT para uso em concretos asfálticos, estabelecidos em sua norma DNIT – ES 031/2006 (DNIT, 2006a), que é de 50% para o desgaste *Los Angeles*, e admite, ainda, excepcionalmente, valores maiores caso estes tenham apresentado desempenho satisfatório em utilização anterior.

Tabela 3.6 – Resultados dos ensaios de abrasão *Los Angeles* realizados com a brita 12,5 mm.

Abertura da peneira de malha quadrada (mm)		Amostras (g)	
Passando	Retido	Graduação C	Graduação especial
12,5	9,5		5000 \pm 10
9,5	6,3	2500 \pm 10	
6,3	4,8	2500 \pm 10	
Massas totais (g)		5000 \pm 10	5000 \pm 10
Número de rotações do tambor		500	500
Número de esferas		8	11
Carga abrasiva (g)		3.330 \pm 20	4.584 \pm 25
Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)		14	15

3.3.3. Massa específica e absorção

As massas específicas reais da areia e do cascalho foram determinadas segundo a norma DNER – ME 194/98 (DNER, 1998d). O valor encontrado para a areia foi 2,576 g/cm³ e para o cascalho foi 2,606 g/cm³. A absorção e a massa específica da brita foram avaliadas através da norma DNER – ME 195/97 (DNER, 1997c). Os valores obtidos foram os seguintes: absorção igual a 1,7%; massa

específica na condição seca igual a $2,577 \text{ g/cm}^3$; e a massa específica na condição saturada com superfície seca igual a $2,628 \text{ g/cm}^3$.

3.3.4. Equivalente de areia

O ensaio de equivalente de areia, realizado pelo método DNER – ME 054/97 (DNER, 1997b), em amostras da areia e do cascalho utilizados na pesquisa foram, respectivamente, 97% e 89%. Estes valores são superiores ao limite estabelecido pela norma DNIT – ES 031/2006 (DNIT, 2006a), para uso em concretos asfálticos, que estabelece um valor mínimo de 55%.

CAPÍTULO 4. DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A proposta deste estudo foi avaliar a viabilidade técnica da utilização de resíduos de gesso em misturas asfálticas, comparando o desempenho de algumas propriedades mecânicas entre uma mistura convencional e outras com adição de gesso. Neste sentido, o presente capítulo aborda todo o procedimento adotado para dosagem das misturas e moldagem de corpos-de-prova submetidos aos ensaios mecânicos.

Os materiais que compuseram o concreto asfáltico estudado foram: o CAP 50-70 e os agregados usualmente empregados no CAUQ para as obras de pavimentação do município de Aracaju, pela EMURB, bem como o resíduo de gesso de construção como material de enchimento, ou filer, dos quais os resultados da caracterização foram registrados no capítulo anterior. O planejamento experimental contemplou a dosagem de três misturas de CAUQ, variando-se entre si a quantidade de gesso adicionada aos agregados, de acordo com os percentuais mostrados na Tabela 4.1. As denominações 0%, 2% e 4%, referem-se à quantidade de gesso presente entre os agregados. A mistura 0% foi também denominada mistura de referência.

Tabela 4.1 – Misturas estudadas, quanto à porcentagem de resíduo de gesso adicionado aos agregados.

Mistura	Proporção de gesso presente nos agregados (%)
Referência ou 0%	0
2%	2
4%	4

As dosagens das misturas asfálticas foram realizadas com base na metodologia Marshall, devido à sua grande utilização no meio rodoviário brasileiro. A norma brasileira que rege esse método é a NBR 12891 (ABNT, 1993). Nesse método, a partir de uma distribuição granulométrica definida, busca-se o teor de ligante adequado para atender aos requisitos da norma adotada para avaliação da mistura. A especificação de referência para concreto asfáltico adotada nessa pesquisa foi a DNIT – ES 031/2006 (DNIT, 2006a), que define a sistemática a ser empregada na execução de camada do pavimento flexível de estradas de rodagem, pela confecção de mistura asfáltica a quente em usina apropriada, utilizando ligante asfáltico, agregados, e material de enchimento (filer). Esta norma ainda estabelece os requisitos referentes aos materiais, equipamentos, execução e controle de qualidade dos materiais empregados, além das condições de conformidade e não-conformidade, e de medição dos serviços.

No processo de dosagem, foram determinadas as propriedades volumétricas de cada mistura e, conseqüentemente, o seu teor de ligante de projeto, conhecido também, no meio rodoviário, como o teor "ótimo" de CAP. Todos os corpos-de-prova foram moldados usando-se um soquete compactador Marshall, eletromecânico, aplicando-se 75 golpes em cada face dos CPs e as misturas com os teores de ligante de projetos previamente definidos para os ensaios mecânicos. O soquete eletromecânico foi utilizado com a finalidade de diminuir alguns efeitos decorrentes da moldagem manual, tais como: variação da frequência de aplicação dos golpes, falta de paralelismo entre as faces planas dos CPs, ou variações das dimensões finais do corpo-de-prova.

As misturas de referência e 2%, também foram moldadas no Compactador Giratório Superpave, pertencente ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará (LMP/DET/UFC), para que as características das misturas submetidas aos dois processos de moldagem fossem comparadas.

4.1. Distribuição dos agregados

Sabe-se que o desempenho de uma mistura asfáltica ao longo de toda sua vida de serviço está diretamente relacionado à sua granulometria, pois dela dependem várias propriedades mecânicas importantes, tais como estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistências à fadiga, à deformação permanente e aos danos causados pela umidade (CUNHA, 2004).

A partir dos resultados da análise granulométrica dos agregados, foram determinadas as proporções de areia, cascalho, brita e resíduo, para misturas do tipo CAUQ, observando-se os limites definidos para a faixa "C" do DNIT. O enquadramento de proporções dos materiais foi feito por tentativas, selecionando-se as distribuições que se ajustassem aos limites da faixa. A faixa "C" foi escolhida por ser destinada à camada de rolamento, que é a aplicação mais comum das misturas asfálticas produzidas pela EMURB para pavimentação na cidade de Aracaju e região metropolitana.

Falcão *et al.* (2003), avaliando a amplitude das faixas granulométricas, em especial a faixa "C" do DNIT à época, estudaram a influência da variação da composição granulométrica nas propriedades mecânicas de misturas do tipo CAUQ. Os autores verificaram que dentro de uma mesma faixa, características como resistência à tração e módulo de resiliência assumem valores diferentes para misturas com distribuição granulométrica diferentes. Além disso, os autores afirmaram que se faz

necessária a avaliação da vida de fadiga no projeto de misturas, bem como de análise mecânica, que leve em consideração a estrutura do pavimento, as características das outras camadas e o carregamento. Como sugestão, aqueles autores recomendaram ainda menores intervalos e tolerâncias nas faixas granulométricas.

O *Strategic Highway Research Program* (SHRP), no projeto conhecido como *Superior Performing Asphalt Pavements* (Superpave) definiu uma forma de representação da granulometria dos agregados da mistura que estabelece pontos de controle e uma zona de restrição, os quais dependem do Tamanho Nominal Máximo (TNM) do agregado, que é o tamanho da abertura de malha da peneira maior do que o primeiro tamanho que retém mais de 10% das partículas da amostra de agregado. Para o Superpave, a curva granulométrica deve estar encaixada entre os chamados pontos de controle. A zona de restrição é uma área próxima à linha de densidade máxima e que a curva granulométrica não deve passar por ela, para que esse espaço possa ser preenchido pelo ligante, o que garantirá certo volume de vazios para evitar exudação da mistura durante a pós-compactação pelo tráfego. Para um TNM igual a 12,5 mm, os pontos de controle e os que definem a zona de restrição estão na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Pontos de controle e zona de restrição Superpave, para TNM = 12,5 mm (adaptado de BERNUCCI *et al.*, 2006).

Abertura (mm)	Massa passando (%)	
	Mínimo	Máximo
Pontos de controle		
19,00	100	-
12,50	90	100
9,50	-	90
2,36	28	58
0,075	2	10
Zona de restrição		
2,36	39,1	39,1
1,18	25,6	31,6
0,60	19,1	23,1
0,30	15,5	15,5

Isso posto, decidiu-se não fazer diferenciações significativas na distribuição granulométrica entre as misturas, a não ser pela adição de pequenas porcentagens de gesso com diâmetros menores que 0,075 mm (peneira nº 200), as quais representassem as adições possíveis que garantissem o enquadramento da mistura na faixa “C” do DNIT. A distribuição granulométrica das misturas 0%, 2% e 4% estão, respectivamente, apresentadas nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 e nas Figuras 4.1, 4.3 e 4.5, nas quais se mostram também os limites da faixa “C”, conforme a norma do DNIT (2006a). Nas Figuras 4.2, 4.4 e 4.6 estão lançados, em gráficos, as curvas de Fuller com os respectivos pontos de controle e zona de restrição estabelecida pelo Superpave.

Tabela 4.3 – Distribuição granulométrica da mistura de referência.

PENEIRA DE MALHA QUADRADA	PORCENTAGEM DE MATERIAL PASSANDO						FAIXA C – DNIT (%)		
	PROPORÇÃO ENTRE AGREGADOS (%)						LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR	TOLERÂNCIAS DA FAIXA
SÉRIE ASTM	ABERTURA (mm)	BRITA 12,5 mm 45,0%	CASCALHO 30,0%	AREIA 25,0%	RESÍDUO 0%	MISTURA 0%			
1"	25,4	100	100	100	-	100,0	100	100	± 7
¾"	19,1	100	100	100	-	100,0	100	100	± 7
½"	12,5	96	97	100	-	97,1	80	100	± 7
3/8"	9,5	75	87	100	-	84,7	70	90	± 7
Nº 4	4,8	24	57	100	-	53,0	44	72	± 5
Nº 10	2,0	5	38	100	-	38,7	22	50	± 5
Nº 40	0,42	3	26	53	-	22,3	8	26	± 5
Nº 80	0,18	2	17	7	-	7,7	4	16	± 5
Nº 200	0,075	1	10	2	-	4,1	2	10	± 2

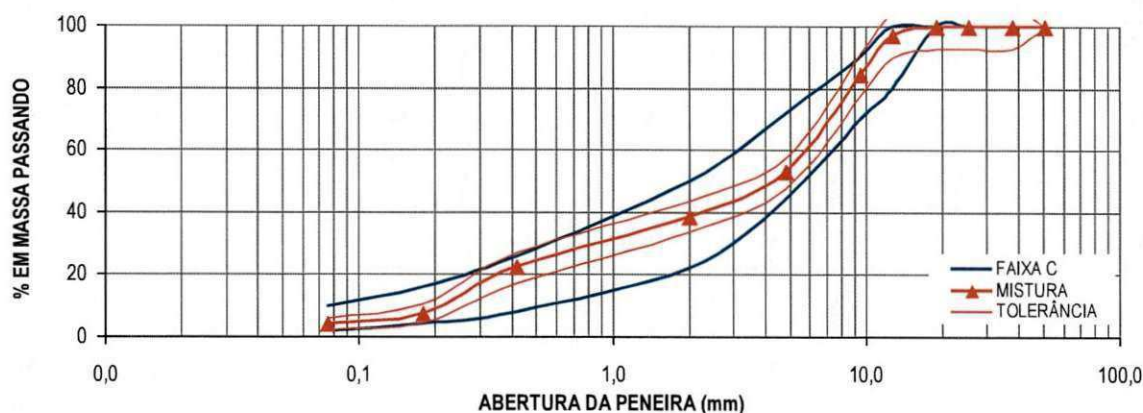


Figura 4.1 – Enquadramento da mistura 0%, sem adição de gesso, na faixa C do DNIT.

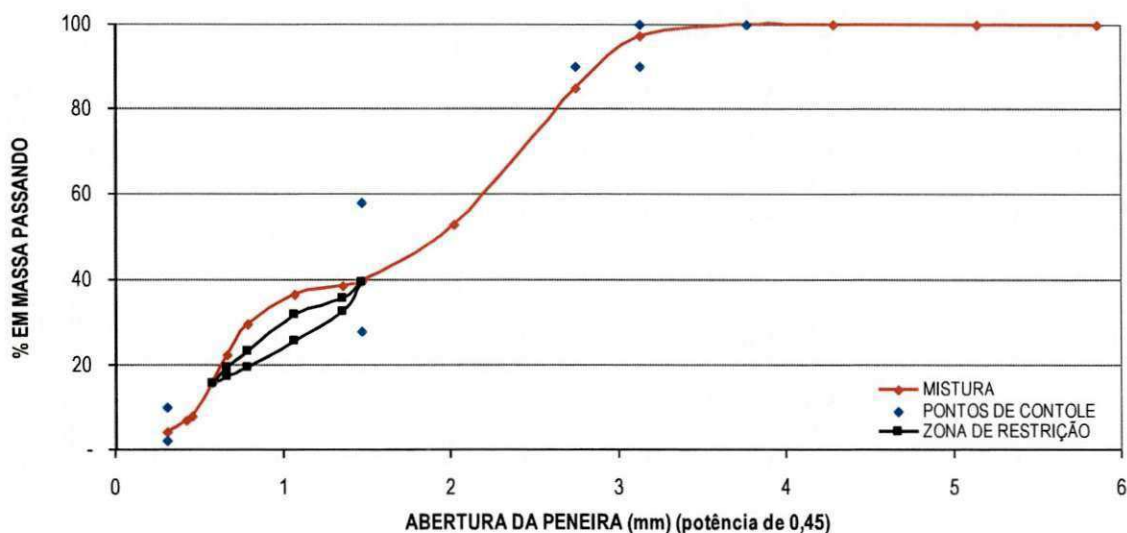


Figura 4.2 – Granulometria Superpave da mistura sem adição de gesso.

Tabela 4.4 – Distribuição granulométrica da mistura 2%.

PENEIRA DE MALHA QUADRADA	PORCENTAGEM DE MATERIAL PASSANDO						FAIXA C – DNIT (%)		
	PROPORÇÃO ENTRE AGREGADOS (%)								
SÉRIE ASTM	ABERTURA (mm)	BRITA				MISTURA 2%	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR	TOLERÂNCIAS DA FAIXA
		12,5 mm 44,1%	CASCALHO 29,4%	AREIA 24,5%	RESÍDUO 2%				
1"	25,4	100	100	100	100	100,0	100	100	± 7
¾"	19,1	100	100	100	100	100,0	100	100	± 7
½"	12,5	96	97	100	100	97,2	80	100	± 7
3/8"	9,5	75	87	100	100	85,0	70	90	± 7
Nº 4	4,8	24	57	100	100	53,9	44	72	± 5
Nº 10	2,0	5	38	100	100	39,9	22	50	± 5
Nº 40	0,42	3	26	53	100	23,9	8	26	± 5
Nº 80	0,18	2	17	7	100	9,6	4	16	± 5
Nº 200	0,075	1	10	2	100	6,0	2	10	± 2

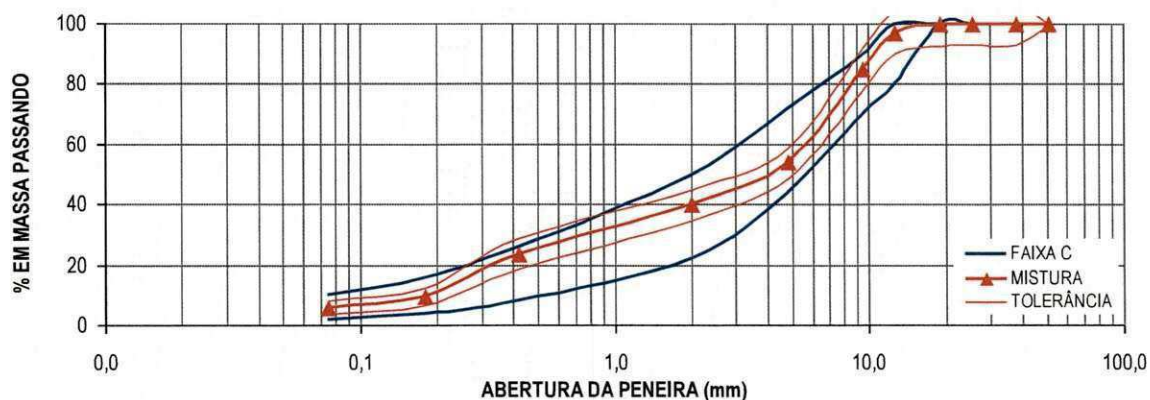


Figura 4.3 – Enquadramento da mistura, com 2% de gesso, na faixa C do DNIT.

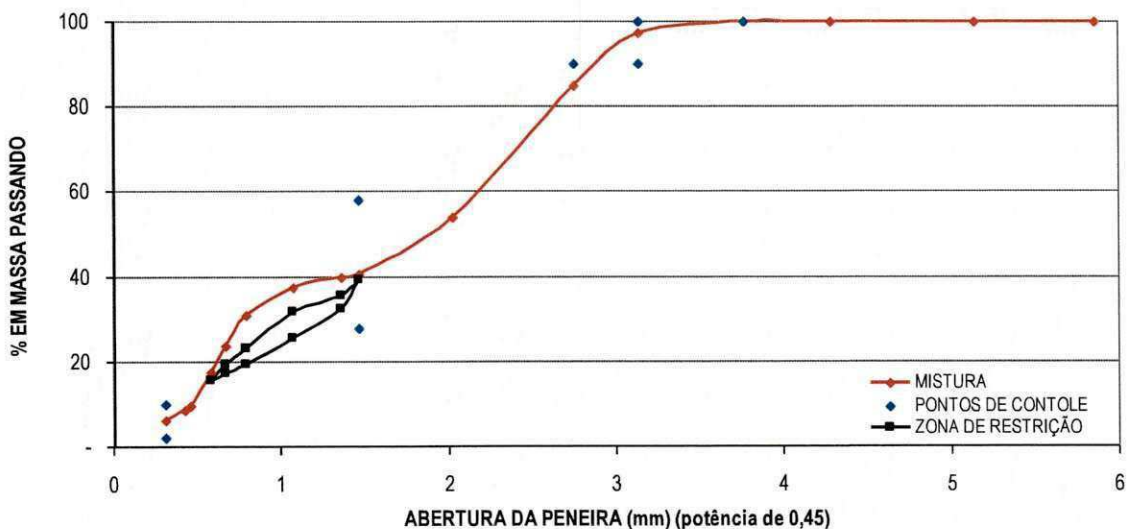


Figura 4.4 – Granulometria Superpave da mistura com 2% de gesso.

Tabela 4.5 – Distribuição granulométrica da mistura 4%.

PENEIRA DE MALHA QUADRADA	PORCENTAGEM DE MATERIAL PASSANDO						FAIXA C – DNIT (%)		
	PROPORÇÃO ENTRE AGREGADOS (%)								
SÉRIE ASTM	ABERTURA (mm)	BRITA 12,5 mm 43,2%	CASCALHO 28,8%	AREIA 24,0%	RESÍDUO 4%	MISTURA 4%	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR	TOLERÂNCIAS DA FAIXA
1"	25,4	100	100	100	100	100,0	100	100	± 7
¾"	19,1	100	100	100	100	100,0	100	100	± 7
½"	12,5	96	97	100	100	97,3	80	100	± 7
3/8"	9,5	75	87	100	100	85,4	70	90	± 7
Nº 4	4,8	24	57	100	100	54,9	44	72	± 5
Nº 10	2,0	5	38	100	100	41,1	22	50	± 5
Nº 40	0,42	3	26	53	100	25,4	8	26	± 5
Nº 80	0,18	2	17	7	100	11,4	4	16	± 5
Nº 200	0,075	1	10	2	100	8,0	2	10	± 2

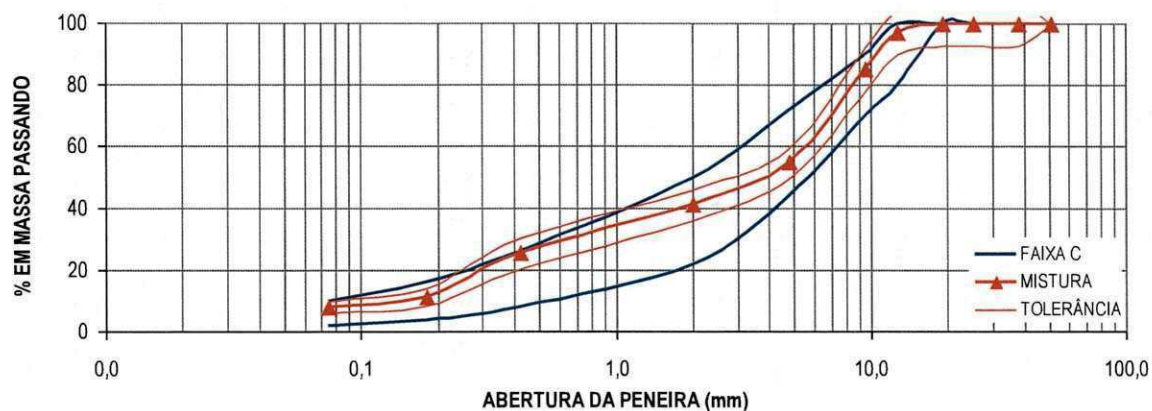


Figura 4.5 – Enquadramento da mistura, com 4% de gesso, na faixa C do DNIT.

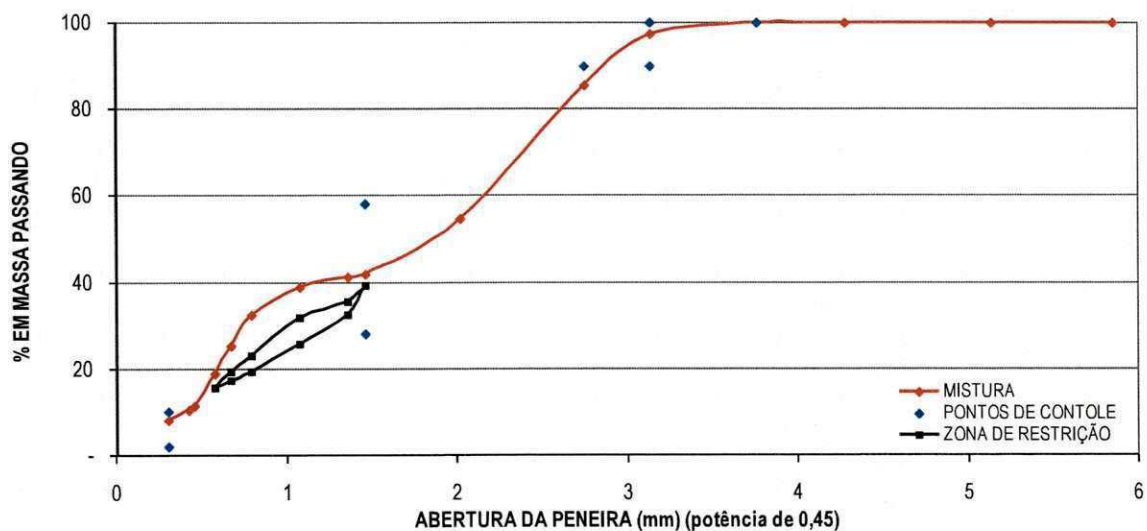


Figura 4.6 – Granulometria Superpave da mistura com 4% de gesso.

As composições das três misturas analisadas estão apresentadas resumidamente na Tabela 4.6. Na Figura 4.7 estão as distribuições granulométricas das três misturas (0%, 2% e 4%) assim como os limites da faixa "C" do DNIT. Na Figura 4.8, mostram-se também as curvas das três misturas, porém, de acordo com o Superpave, onde se percebe que a curva passa por entre os pontos de controle e por cima da zona de restrição.

Tabela 4.6 – Composição das três misturas estudadas.

Denominação	Brita 1/2" (%)	Cascalho (%)	Areia (%)	Resíduo de gesso (%)
0%	45,0	30,0	25,0	0,0
2%	44,1	29,4	24,5	2,0
4%	43,2	28,8	24,0	4,0

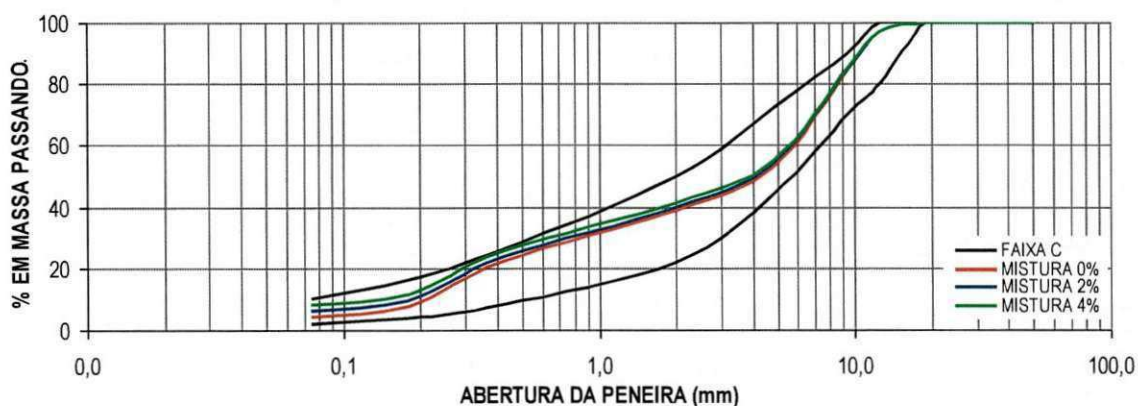


Figura 4.7 – Enquadramento das misturas 0%, 2% e 4% na faixa C do DNIT.

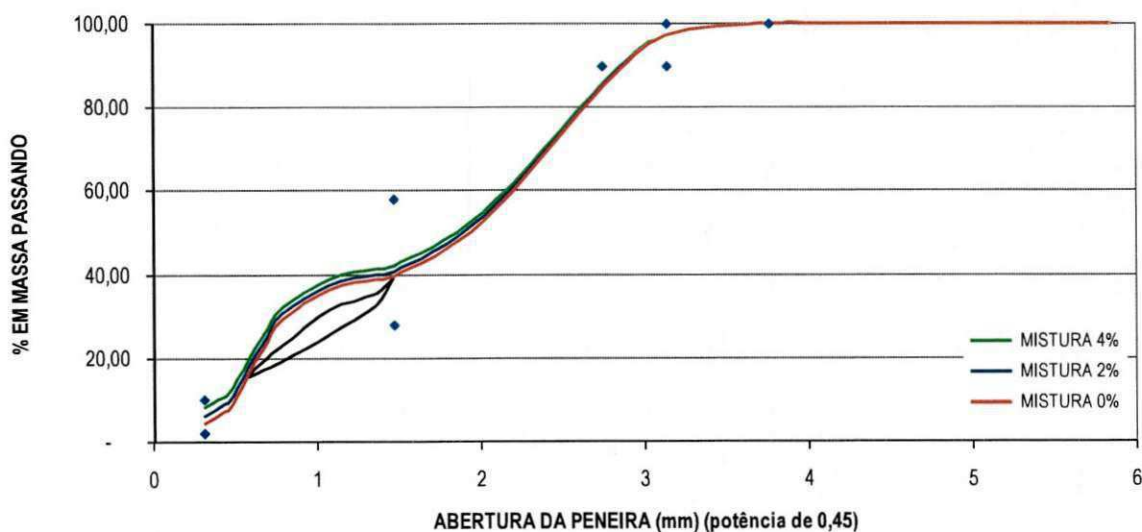


Figura 4.8 – Granulometria Superpave das misturas 0%, 2% e 4% - $D_{M\acute{A}X} = 12,5$ mm.

4.2. Parâmetros volumétricos

No procedimento de dosagem de misturas asfálticas foram determinadas algumas características físicas das misturas, as quais são denominadas de parâmetros volumétricos. São eles: Densidade Máxima Teórica (DMT), densidade aparente da mistura (D_a), volume de vazios (V_v), vazios cheios de betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM), e relação betume/vazios (RBV). A partir da interpretação da Figura 4.9, o significado e a determinação de alguns desses parâmetros podem ser identificados diretamente e obtidos de forma analítica. A Figura 4.10 foi colocada para melhorar a compreensão da definição dos parâmetros volumétricos em uma mistura asfáltica.

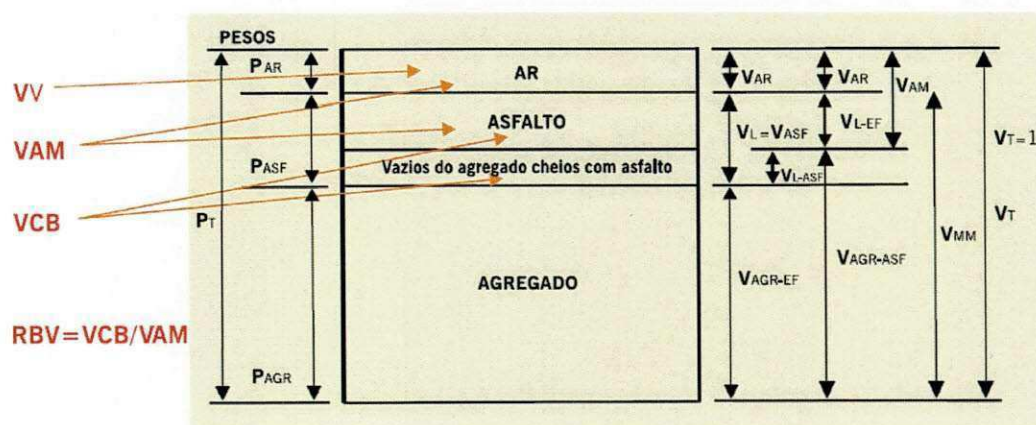


Figura 4.9 – Volumetria em uma mistura asfáltica (adaptado de BERNUCCI *et al.*, 2006).

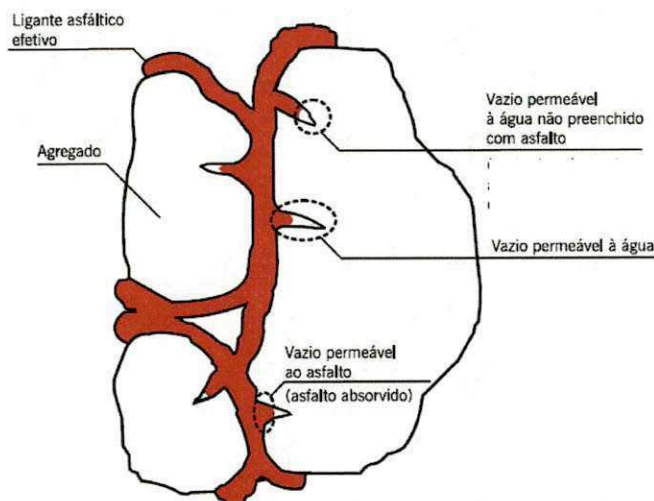


Figura 4.10 – Esquema de componentes em uma mistura asfáltica compactada (adaptado de ASPHALT INSTITUTE, 1995 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2006).

A Densidade Máxima Teórica (DMT) é a razão entre a massa total, agregados e ligante asfáltico, e a soma dos volumes dos agregados, dos vazios impermeáveis, dos vazios permeáveis não preenchidos de asfalto e do total de asfalto, conforme a Equação 4.1. O valor da DMT é uma ponderação das massas específicas reais dos materiais que compõem as misturas.

$$DMT = \frac{100}{\frac{P_{CAP}}{D_{CAP}} + \frac{P_1}{D_1} + \frac{P_2}{D_2} + \dots + \frac{P_n}{D_n}} \quad (4.1)$$

Onde: $P_{CAP}; P_1; P_2; P_n$: porcentagem dos materiais na mistura (%);

$D_{CAP}; D_1; D_2; D_n$: massas específicas reais dos materiais na mistura (g/cm^3).

No Brasil, algumas instituições de pesquisa determinam a Densidade Máxima Medida (DMM), que também é dada pela razão entre a massa do agregado mais a massa do ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, dos vazios impermeáveis, dos vazios permeáveis não preenchidos de asfalto e do total de asfalto, no entanto, a massa e o volume são determinados diretamente da mistura, e não para cada material da mistura, como na DMT. A forma de determinação da DMM é conhecida como método Rice, e é baseado nas normas americanas ASTM D 2041 (ASTM, 2000a) e AASHTO T 209 (1994). As vantagens são que a DMM dispensa a obtenção de massas específicas dos materiais separadamente e já considera a absorção de ligante pelos agregados. No entanto, não existe uma norma brasileira que descreva esse procedimento. Pode-se utilizar, portanto, de normas estrangeiras, como as americanas, da ASTM ou da AASHTO (BERNUCCI *et al.*, 2006). Nessa pesquisa, optou-se pela adoção da DMT pelo fato de ser o procedimento ora regulamentado no país (ABNT, 1993), e pela atual disponibilidade de equipamentos do laboratório.

A densidade aparente da mistura compactada (D_a) é a razão entre a massa do corpo-de-prova (CP) ao ar, e a diferença entre a massa ao ar e a massa submersa do CP, conforme a Equação 4.2. No Brasil o procedimento é descrito em DNER – ME 117/94 (DNER, 1994c), sendo esse o procedimento adotado na pesquisa.

$$D_a = \frac{P_{ar}}{P_{ar} - P_{imerso}} \quad (4.2)$$

Onde: P_{ar} : massa do CP seco ao ar (g).

P_{imerso} : massa do CP submerso (g).

Assim como para a densidade máxima, a densidade aparente também pode ser considerada de outra forma, onde, no cálculo do volume do CP (denominador da Equação 4.2), o peso seco é substituído pelo peso do CP em condição de saturação, porém com superfície seca. A norma americana que trata da densidade aparente do CP saturado com superfície seca é a ASTM 2726 (ASTM, 2000b).

De acordo com Marques (2004), a norma brasileira é adequada quando se pretende medir a densidade aparente de amostras densas, como as dessa pesquisa, com poucos vazios ou vazios oclusos, enquanto a especificação americana é mais apropriada para misturas de graduação mais aberta.

Segundo Vasconcelos & Soares (2005) o teor de projeto de ligante não altera muito quando são utilizados os métodos de determinação da densidade máxima e da densidade aparente, das normas brasileiras ou americanas, em misturas de graduação contínua, como é o caso deste estudo.

O volume de vazios (Vv) é obtido a partir da divisão da diferença entre a densidade máxima teórica e a densidade aparente da mistura compactada, pela densidade máxima teórica, conforme a Equação 4.3. Esse indicador tem sua importância devido à relação entre os vazios da mistura e o processo de oxidação do ligante na massa asfáltica por ação da água e do ar pela exposição superficial do CAP, e de problemas de exsudação do ligante com a liberação do tráfego, além da influência em outras características mecânicas, como, por exemplo, o módulo de resiliência e deformação permanente.

$$Vv(\%) = \frac{DMT - D_a}{DMT} \cdot 100 \quad (4.3)$$

Vazios cheios de betume (VCB) é a razão da multiplicação da densidade aparente da mistura compactada pela porcentagem de CAP (P_{CAP}), e a densidade real do CAP (D_{CAP}), conforme a Equação 4.4.

$$VCB(\%) = \frac{D_a \times P_{CAP}}{D_{CAP}} \cdot 100 \quad (4.4)$$

O valor dos vazios do agregado mineral (VAM) é dado pela soma do volume de vazios (Vv) e dos vazios com betume (VCB), conforme a Equação 4.5.

$$VAM(\%) = Vv + VCB = \left(\frac{DMT - D_a}{DMT} + \frac{D_a \times P_{CAP}}{D_{CAP}} \right) \cdot 100 \quad (4.5)$$

A relação betume/vazios (RBV) é a razão entre os vazios cheios de betume e os vazios do agregado mineral, conforme a Equação 4.6.

$$RBV(\%) = \frac{VCB}{VAM} \cdot 100 \quad (4.6)$$

4.3. Moldagem dos corpos-de-prova pela metodologia Marshall

Na preparação das amostras para a dosagem de cada uma das misturas, foi utilizada a metodologia Marshall descrita em detalhes pelas normas da ABNT (1993) e DNER (1995). A seguir são mostradas, de forma sucinta, as etapas que foram adotadas nesta pesquisa:

- Determinação da granulometria dos agregados;
- Seleção da faixa granulométrica a ser utilizada, nesse caso a faixa "C" do DNIT (2006a);
- Escolha da composição dos agregados, de forma a enquadrar a sua mistura nos limites da faixa granulométrica escolhida;
- Determinação das massas específicas reais do CAP, dos agregados e do filler, para o cálculo da DMT;
- Determinação das temperaturas de mistura e de compactação, a partir da curva viscosidade *versus* temperatura do ligante escolhido;
- Definição dos teores de asfalto para os diferentes grupos de corpos-de-prova (CP). Foram moldados sete (7) grupos para a mistura de referência e 5 grupos para as misturas 2% e 4%. Cada grupo era formado por 3 CPs, perfazendo, assim, um total de 51 CPs. Para um grupo de cada mistura, um teor de CAP inicial foi estimado e com incrementos de $\pm 0,5\%$ foram moldados dois grupos com teores abaixo do teor estimado em todas as misturas, quatro grupos acima na mistura de referência, e dois grupos acima nas misturas 2% e 4%;
- A preparação dos agregados para moldagem dos CPs foi realizada através da separação, após repartição de amostras, por CP, em embalagens descartáveis de

alumínio. Cada CP foi preparado de forma que, com a inclusão do CAP, tivesse uma massa total de 1.200 g (Figura 4.11).



Figura 4.11 – Preparação dos materiais granulares para moldagem dos CPs.

- A temperatura do ligante, quando preparado para ser misturado aos agregados, foi determinada através da curva de viscosidade Brookfield (P)¹ versus temperatura do ligante (°C), traçada com dados da caracterização do CAP, conforme mostrado na Figura 4.12, sendo a média daquelas temperaturas que apresentaram uma viscosidade de 1,5 P e 1,9 P. Os agregados foram aquecidos em estufa à temperatura do ligante, acrescida de 12,5 °C². A temperatura de compactação, obtida também do gráfico de viscosidade, foi determinada pela temperatura média daquelas que apresentaram uma viscosidade de 2,5 P e 3,1 P. Os resultados da determinação das temperaturas de mistura e compactação da massa asfáltica estão expressos na Tabela 4.7.

¹ O poise (símbolo P) é a unidade de viscosidade dinâmica no sistema CGS de unidades: 1 P = 1 g/cm.s. A unidade análoga no Sistema Internacional de Unidades é o pascal segundo (Pa.s): 1 Pa.s = 1 kg/m.s = 10 P.

² A temperatura de mistura dos agregados deve ser de 10 a 15 °C a mais que a do ligante. Ao resíduo de gesso foi dada uma especial atenção, devido à sua capacidade de absorção de umidade, portanto nos procedimentos de mistura, o tempo de exposição ao ar em temperatura ambiente dos agregados antes serem misturados ao ligante, era o menor possível.

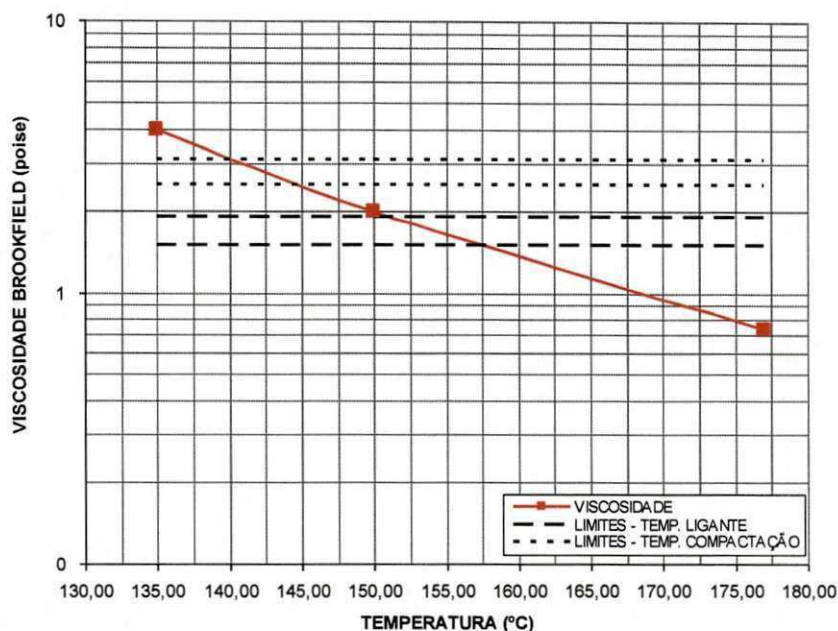
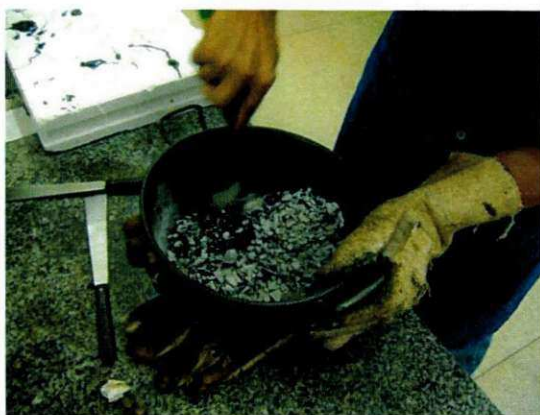


Figura 4.12 – Gráfico para determinação da temperatura do ligante e de compactação para moldagem dos CPs.

Tabela 4.7 – Temperaturas de mistura e compactação dos materiais.

	Temperaturas limites para viscosidade atender a norma (°C)	Temperatura média adotada na moldagem (°C)
Ligante asfáltico	151 a 157	154,0
Agregados	161 a 172	166,5
Compactação	140 a 145	142,5

- Após o aquecimento, até a temperatura de mistura (154 °C para o CAP e 166,5 °C para os agregados), os materiais de cada CP foram misturados manualmente por 2 minutos, inseridos e acomodados nos moldes da mistura, o que se deu pela aplicação de 15 golpes na região periférica e 10 golpes na região central do molde com espátula metálica. Os moldes cilíndricos foram pré-aquecidos a 100 °C (Figura 4.13);
- Compactação mecânica com a aplicação de setenta e cinco (75) golpes do soquete Marshall, em cada face do CP, no compactador Marshall eletromecânico;



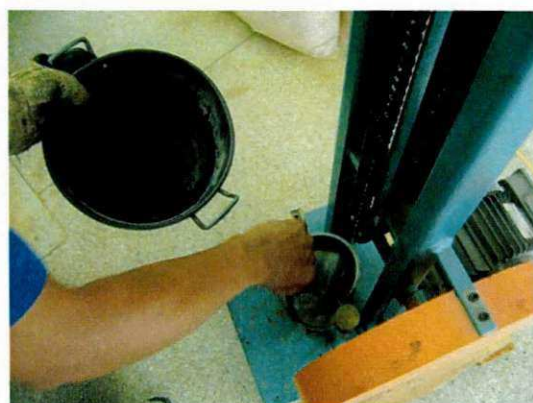
(a) Início da mistura do CAP aos agregados.



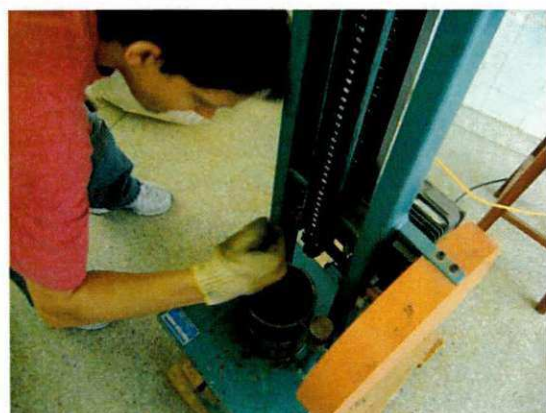
(b) Final da mistura do CAP aos agregados.



(c) Moldes pré-aquecidos.



(d) Mistura sendo colocada no molde.



(e) Acomodação da mistura no molde.



(f) Compactação em andamento.

Figura 4.13 – Moldagem de CPs no compactador Marshall eletromecânico.

- Após o resfriamento e a desmoldagem dos CPs, tomaram-se as suas dimensões (diâmetro e altura). Determinou-se para cada CP suas massas seca, e a massa submersa em água. Com estes valores foi possível obter a densidade aparente dos

corpos-de-prova, que, por comparação com a densidade máxima teórica, permitiu o cálculo dos parâmetros volumétricos típicos da dosagem (Figura 4.14);

- Após as medidas volumétricas, os CPs foram submersos em banho-maria a 60 °C por 30 min. Retiraram-se cada CP do banho colocando-os imediatamente no molde de compressão. Determinou-se, então, por meio da prensa Marshall, a estabilidade e a fluência (Figura 4.15);
- A partir dos parâmetros volumétricos e mecânicos obtidos, determinou-se o teor de projeto.

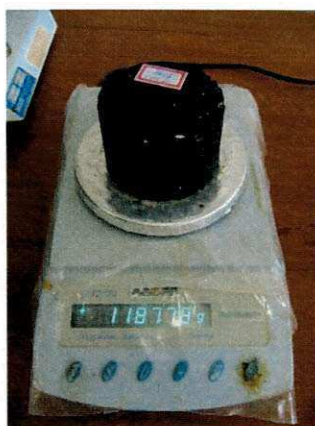
De acordo com Coelho & Sória (1992), a variabilidade nos valores dos parâmetros volumétricos dos CPs (densidade, volume de vazios e relação betume/vazios), inerente ao ensaio Marshall, é relativamente baixa nas misturas para concreto asfáltico. Por outro lado, as dispersões dos parâmetros de resistência mecânica da mistura, medidos através da estabilidade e da fluência são bem mais significativas. Esses autores indicaram ainda que os fatores que influenciam nos resultados do método Marshall são:

- Tempo de mistura, dos diversos materiais envolvidos, insuficiente para obtenção de misturas realmente homogêneas;
- Compactação ineficiente e em desigualdade de condições entre os CPs;
- 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, tais como: condicionamento dos agregados à temperatura de mistura por no mínimo 12 horas; fixação do tempo de mistura manual dos materiais em 2 minutos, e do tempo de exposição dos CPs ao banho-maria em 30 minutos; moldagem dos CPs em um compactador eletromecânico (Figura 4.16), que aplica os golpes a uma frequência de 1 Hz; moldagem, determinação dos parâmetros volumétricos, e rompimento dos CPs na prensa Marshall para verificar a fluência e estabilidade, em ordem aleatória. A moldagem dos CPs obedeceu ao que preconiza a norma DNER-ME 043/95 (DNER, 1995).



(a) Desmoldagem dos CPs.



(b) Pesagem dos CPs secos.



(c) Pesagem dos CPs submersos.

Figura 4.14 – Desmoldagem, pesagem do CP seco e pesagem submersa do CP.



(a) Amostras submetidas a 60 °C por 30 min no banho-maria.



(b) Medida da estabilidade e fluência.

Figura 4.15 – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall.

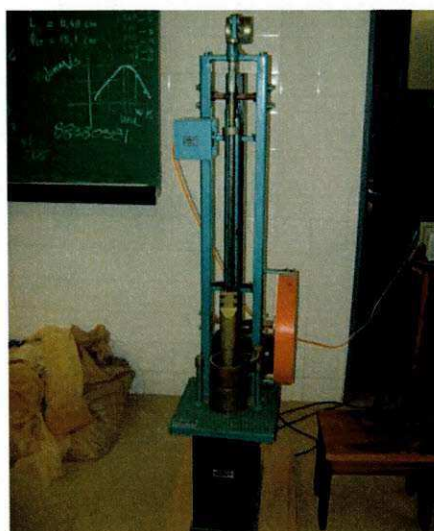


Figura 4.16 – Compactador Marshall eletromecânico do GEOPAV.

4.4. Teor de ligante de projeto

A determinação dos teores de ligante de projeto (TP), ou teores ótimos de ligante, em cada mistura foi feita a partir dos valores de volume de vazios e da relação betume/vazios. Estes dois últimos parâmetros volumétricos devem atender aos limites do DNIT, para CAUQ aplicado como camada de rolamento (faixa "C"), e a verificação de que, no teor de projeto, o valor mínimo para a estabilidade da mistura (500 kgf) estaria atendido.

A determinação do teor de projeto do ligante nessa pesquisa foi baseada em dois parâmetros volumétricos: Volume de vazios (Vv) e a relação betume/vazios (RBV), determinados pelas Equações 4.3 e 4.6.

Nas Figuras 4.17 a 4.20 são apresentadas, respectivamente, as variações de Vv, RBV, D_a , e VAM médios dos grupos, em função do teor de ligante de cada mistura. Das Figuras 4.17 e 4.20 observa-se que, para um mesmo teor de ligante, a mistura sem gesso apresentou valores de Vv e de VAM maiores, enquanto que, das Figuras 4.18 e 4.19 observa-se que os valores da RBV e D_a são menores. As misturas 2% e 4% apresentaram comportamentos semelhantes, sugerindo que existe uma quantidade de gesso adicionado aos agregados que resulta numa dosagem com teor de projeto mínimo. Neste caso, o teor mínimo estaria situado entre a quantidade correspondente aos percentuais de 2% e 4%.

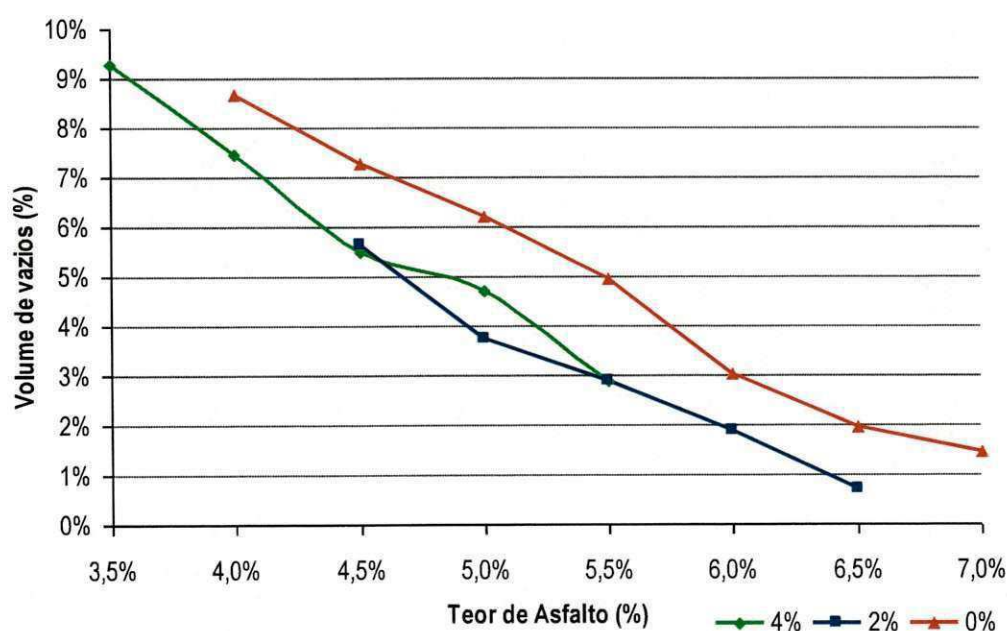


Figura 4.17 – Variação do Vv em função do teor de ligante e de gesso nas dosagens.

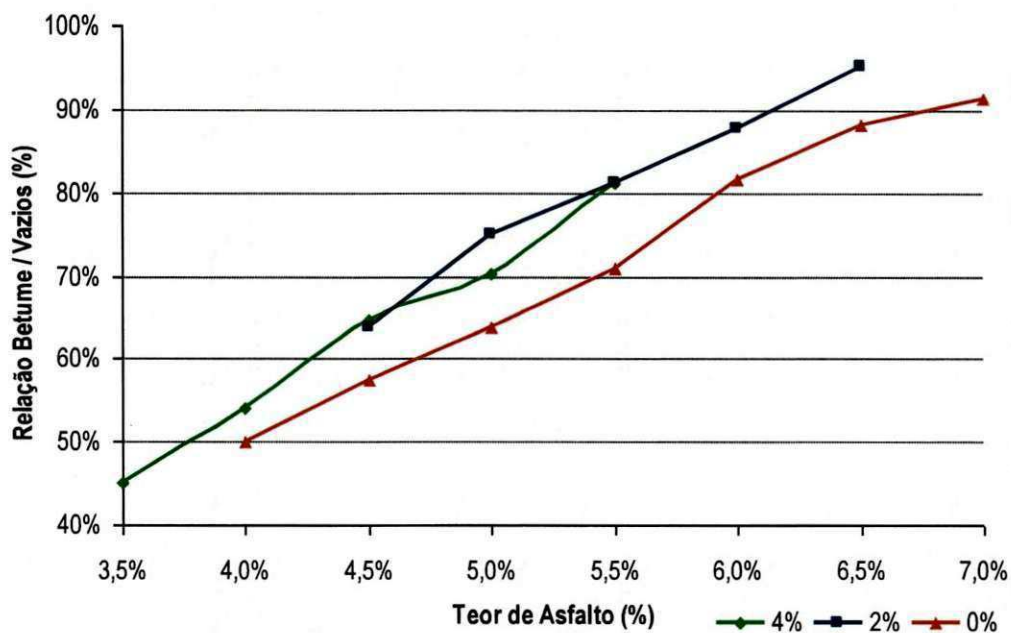


Figura 4.18 – Variação do RBV em função do teor de ligante e de gesso nas dosagens.

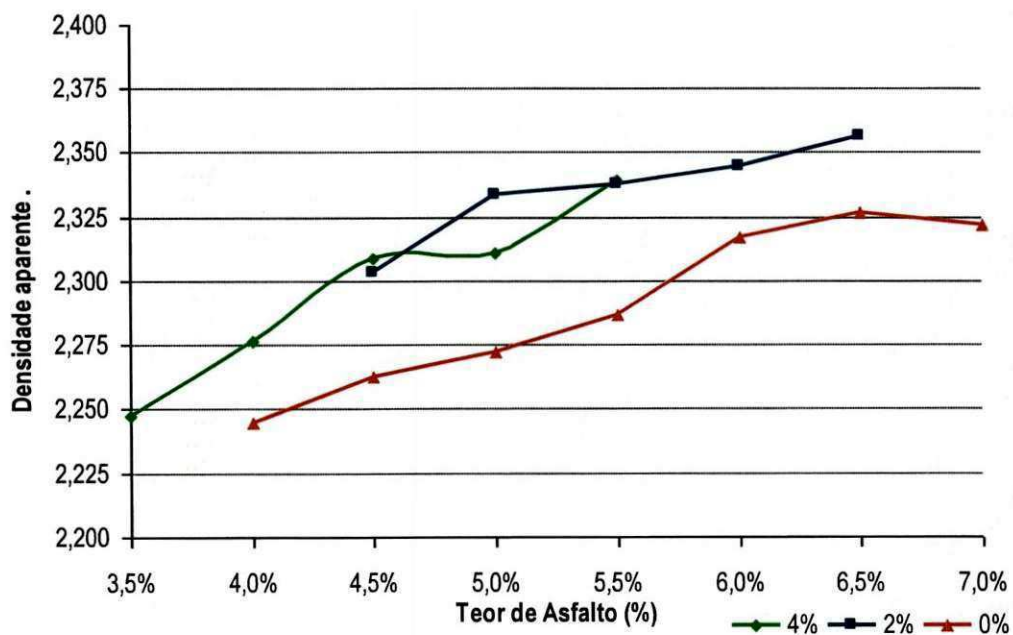


Figura 4.19 – Variação da densidade aparente (Da) em função do teor de ligante e de gesso nas dosagens.

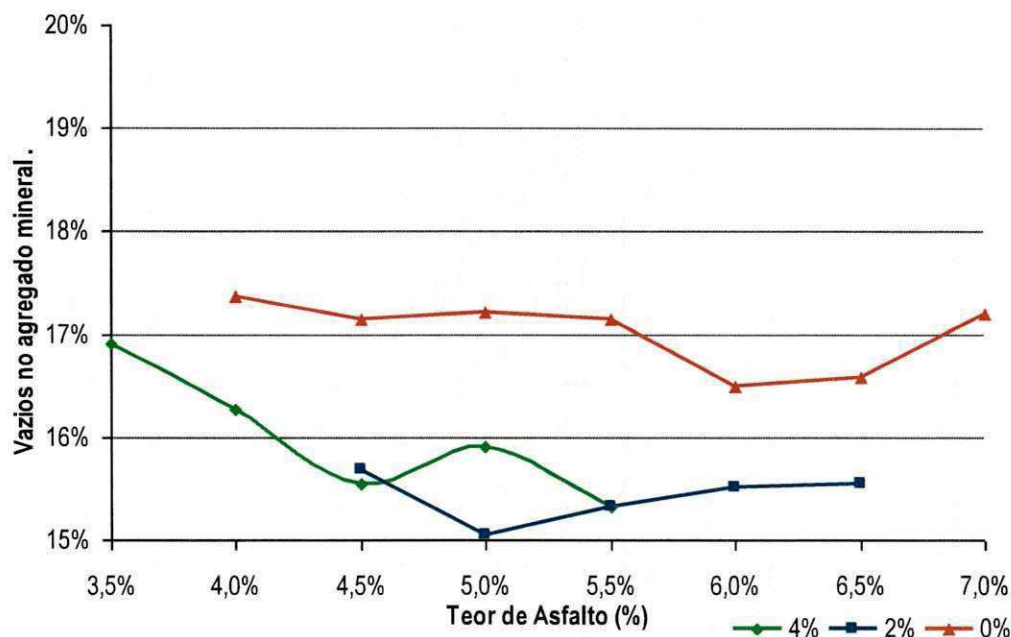


Figura 4.20 – Variação do VAM em função do teor de ligante e de gesso nas dosagens.

Com os valores médios de Vv e RBV de cada grupo, apresentados nas Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10, foram traçados gráficos do teor de ligante (%) versus Vv (%) e RBV (%), conforme está mostrado nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23. A partir das equações das linhas de tendência que relacionam o teor de CAP (%) com Vv (%) e RBV (%), foram determinados quatro teores de CAP (%), para os quatro valores limites preconizados na norma do DNIT (2006a) em cada mistura estudada, quais sejam, Vv entre 3,0% e 5,0%, e RBV entre 75,0% e 82,0%.

Com base nos teores de CAP referentes aos limites da norma, em ordem crescente, o TP adotado foi a média dos dois teores centrais, para cada mistura, os quais estão registrados na Tabela 4.11. Este método de determinação do teor de CAP de projeto é adotado pelo DNIT e é descrito em detalhes por Soares *et al.* (2000).

Tabela 4.8 – Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura 0%.

Teor de CAP (%)	DMT	D _a	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
4,0	2,458	2,245	8,69	17,4	50,0
4,5	2,441	2,263	7,29	17,2	57,5
5,0	2,423	2,273	6,22	17,2	63,9
5,5	2,406	2,287	4,98	17,2	71,0
6,0	2,390	2,317	3,04	16,5	81,6
6,5	2,373	2,327	1,95	16,6	88,3
7,0	2,357	2,322	1,46	17,2	91,5

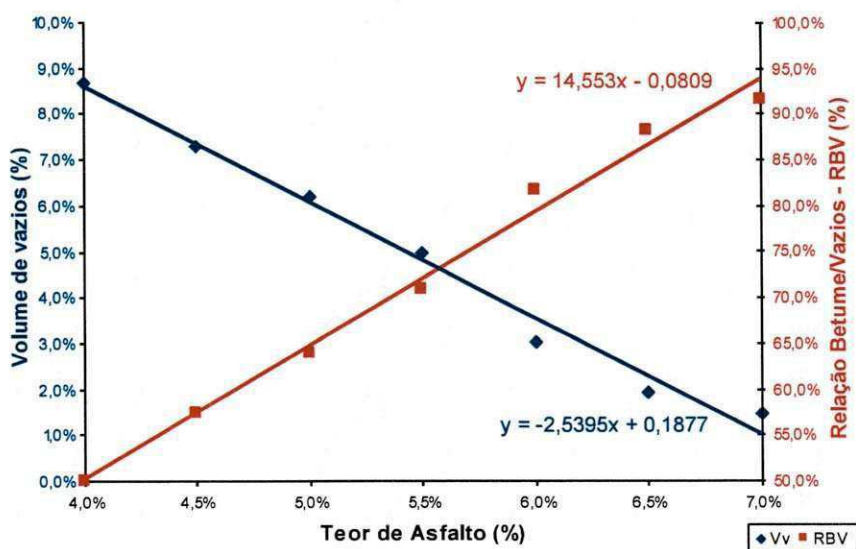


Figura 4.21 – Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura de referência.

Tabela 4.9 – Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura 2%.

Teor de CAP (%)	DMT	D _a	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
4,5	2,442	2,304	5,66	15,7	63,9
5,0	2,425	2,333	3,76	15,0	75,0
5,5	2,407	2,338	2,88	15,3	81,2
6,0	2,391	2,345	1,90	15,5	87,7
6,5	2,374	2,357	0,73	15,6	95,3

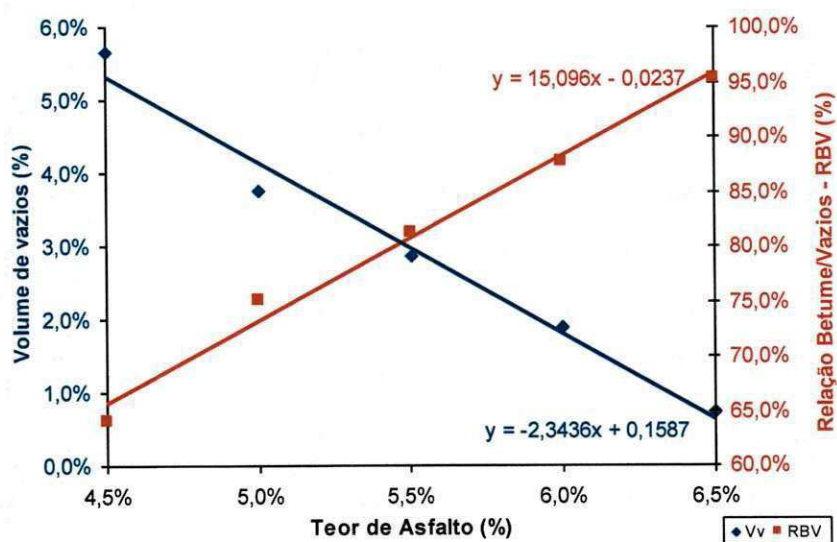


Figura 4.22 – Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 2% de gesso.

Tabela 4.10 – Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura 4%.

Teor de CAP (%)	DMT	D _a	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
3,5	2,478	2,248	9,30	16,9	45,0
4,0	2,461	2,277	7,46	16,3	54,2
4,5	2,443	2,309	5,49	15,5	64,7
5,0	2,426	2,311	4,72	15,9	70,3
5,5	2,409	2,339	2,88	15,3	81,2

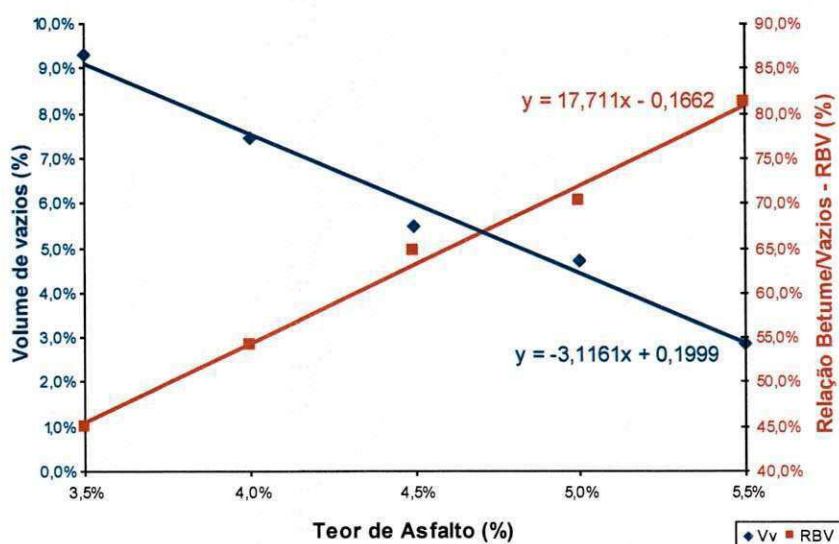


Figura 4.23 – Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 4% de gesso.

Tabela 4.11 – Determinação do teor de ligante de projeto.

Mistura	Vv		RBV		TP
	3%	5%	75%	82%	
Referência ou 0%	6,21	5,42	5,71	6,19	5,95%
2%	5,49	4,64	5,13	5,59	5,31%
4%	5,45	4,81	5,17	5,57	5,31%

Os TP encontrados foram 5,95%, 5,31%, e 5,31%, para as misturas 0%, 2% e 4%, respectivamente (Figura 4.24). As misturas 2% e 4% tiveram o TP reduzido em relação à mistura de referência. Essa redução é importante do ponto de vista financeiro, pois o CAP é o componente de preço mais elevado na mistura. Na pesquisa realizada por Cavalcante & Soares (2001), em que foi avaliado o efeito da adição de seis tipos de fíleres em CAUQ (areia de campo, pó de pedra, cimento *Portland*, pó calcário, carbonato de magnésio e cal hidratada), o TP também diminuiu com o aumento

do teor de filler em todas as misturas. Uma quantidade adequada de filler preenche vazios da estrutura dos agregados que são, na ausência desse material, ocupados pelo ligante.

Soares *et al.* (2000) ressaltam que as dosagens realizadas através de critérios volumétricos não são uma garantia de que o TP será o melhor teor para os aspectos de comportamento mecânico de uma mistura asfáltica. Portanto, uma análise combinada da granulometria com a avaliação das características mecânicas da mistura deve complementar o projeto de dosagem, considerando o tipo de CAP disponível e a aplicação que será dada à mistura na estrutura do pavimento.

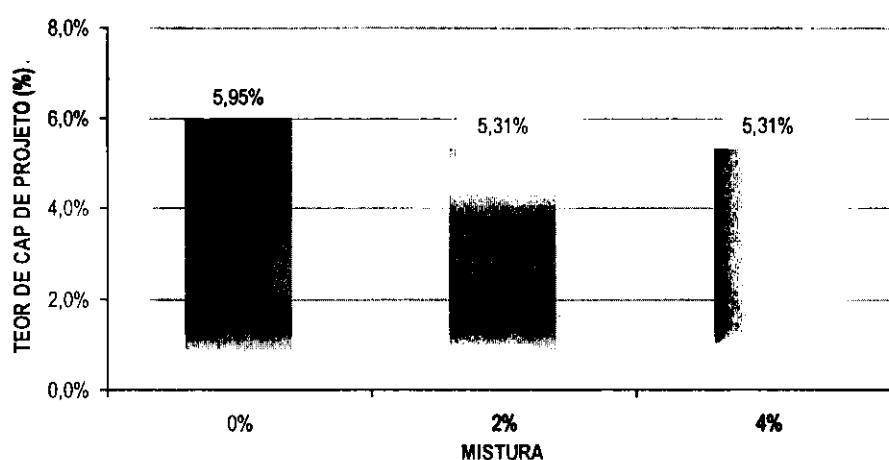


Figura 4.24 – Teores de ligante de projeto para as misturas estudadas.

4.5. Estabilidade e fluência do ensaio Marshall

A norma DNER-ME 043/95 (1995) define estabilidade como a carga máxima para a qual o CP resiste antes da ruptura, para um deslocamento máximo, ou quebra de agregado, de modo a causar diminuição na carga necessária para manter o prato da prensa se deslocando a uma velocidade constante (0,8 mm/s). Fluência é o deslocamento vertical apresentado pelo CP correspondente à aplicação da carga máxima.

A especificação DNIT (2006a) de CAUQ estabelece que a estabilidade mínima para CAUQ, cujos CPs são submetidos a 75 golpes por face é de 500 kgf, tanto em camadas de rolamento, quanto em camadas de ligação (binder). No ensaio, o valor da estabilidade é carga aplicada no instante da ruptura do CP. A estabilidade é obtida em unidade de força, pela multiplicação do valor da constante do anel

dinamométrico da prensa pela leitura do extensômetro que mede sua deformação. Esse valor sofre uma correção que é função das dimensões do CP.

Nas Figuras 4.25 e 4.26 são mostrados os gráficos dos valores médios de estabilidade e fluência em função dos teores de CAP dos grupos de CPs nas dosagens. Quanto à estabilidade, as misturas de referência e 2% superaram 500 kgf em todos os teores utilizados e em alguns teores a estabilidade da mistura 2% foi maior que a de referência; na mistura 4% a estabilidade é crescente com o teor de CAP, atende o limite apenas nas proximidades do TP, e o grupo com 3,5% de CAP não apresentou resistência no ensaio e por isso não foi possível medir sua estabilidade e fluência. Quanto à fluência, as misturas de referência e 2% tiveram valores crescentes com o aumento do teor de CAP, a mistura 2% apresentou tendência de fluência maior, para quase todos os teores, que a 0%; a mistura 4% não acompanhou a tendência das demais, se caracterizou por valores altos em todos os grupos, e não foi possível definir uma tendência da variação da fluência com o teor de CAP.

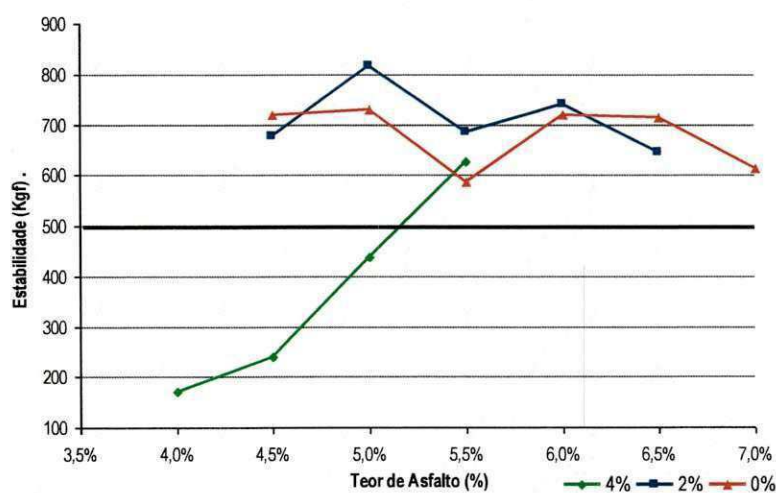


Figura 4.25 – Variação da estabilidade em função do teor de ligante e de gesso nas dosagens.

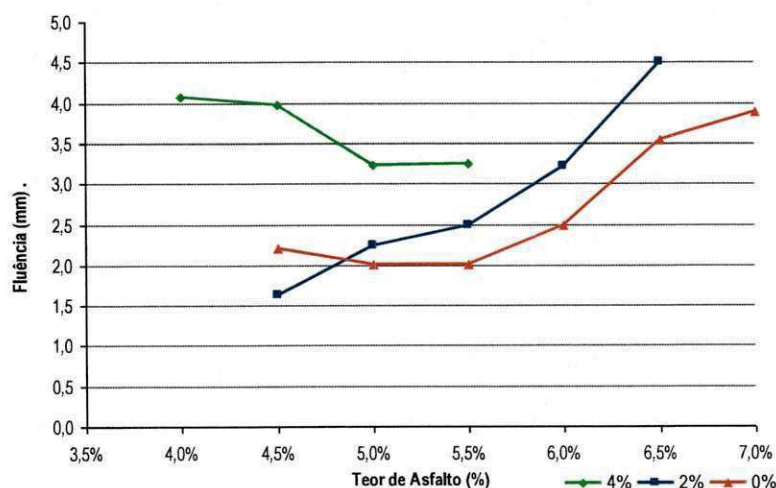


Figura 4.26 – Variação da fluência em função do teor de ligante e de gesso nas dosagens.

Para a verificação da estabilidade e fluência no TP, foram moldados 3 CP de cada mistura. A Tabela 4.12 apresenta os valores da estabilidade e fluência Marshall de cada CP. Nas Figuras 4.27 e 4.28 são apresentados graficamente os resultados da estabilidade e fluência médios de cada mistura. Consideradas as variações dos resultados individuais dos CPs em cada mistura, a de referência teve maior estabilidade média, mas, nas duas misturas com gesso a estabilidade foi maior que 500 kgf. Assim, todos os valores médios da estabilidade satisfizeram aos requisitos da especificação. A mistura de 4% apresentou maior fluência que as misturas de referência e 2%, o que pode estar associado a uma concentração crítica de filer e sua influência no mástique, ou a uma exposição do gesso à água durante o condicionamento dos CPs no banho-maria. A redução da fluência da mistura de referência para a mistura 2% deve-se à redução do teor de ligante, que tornou a mistura mais rígida.

Tabela 4.12 – Determinação da estabilidade e fluência no teor de ligante de projeto de cada mistura.

Estabilidade						
Mistura	Observação (kgf)			Média (kgf)	Desvio Padrão (kgf)	Coeficiente de variação (%)
	1	2	3			
0%	845,10	762,75	608,19	738,68	120,28	16,28
2%	470,26	541,16	655,75	555,73	93,60	16,84
4%	597,50	707,38	683,20	662,69	57,74	8,71

Fluência						
Mistura	Observação (mm)			Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coeficiente de variação (%)
	1	2	3			
0%	3,110	2,870	2,190	2,723	0,477	17,52
2%	2,500	2,660	2,460	2,540	0,106	4,17
4%	2,940	3,500	3,270	3,237	0,281	8,68

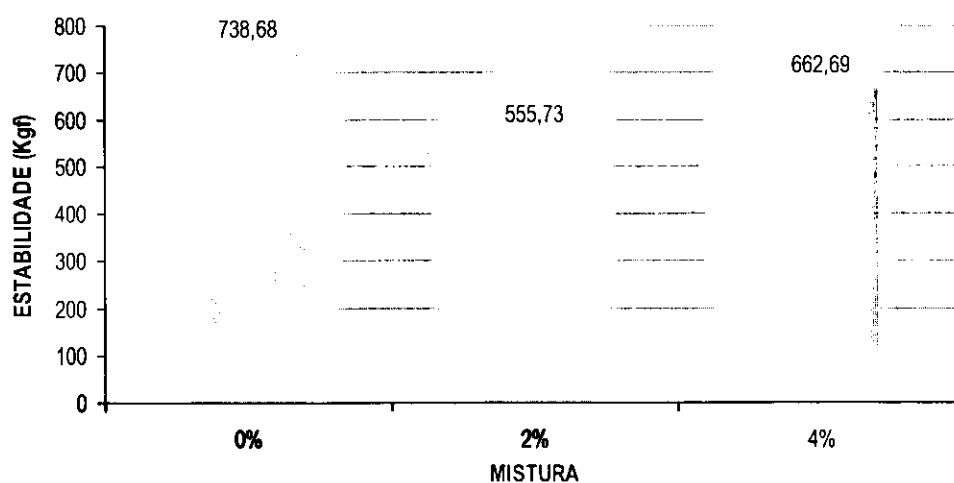


Figura 4.27 – Variação da estabilidade Marshall (média) em função do percentual de gesso na mistura.

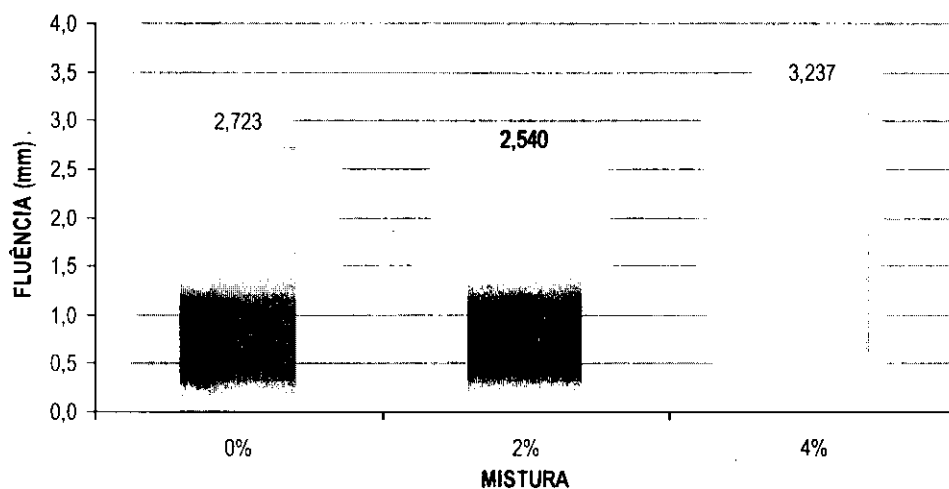


Figura 4.28 – Variação da fluência Marshall (média) em função do percentual de gesso na mistura.

4.6. Moldagem de corpos-de-prova pela metodologia Superpave

Apesar de não ter sido utilizada a dosagem Superpave nesta pesquisa, as misturas de referência e com adição de 2% de resíduo foram avaliadas, quando submetidas à moldagem por esse método. Da análise granulométrica observa-se que todas as misturas atenderam aos requisitos do método Superpave, quanto ao enquadramento entre os pontos de controle e o desvio da zona de restrição. A mistura 4% foi excluída da moldagem por ter apresentado grande susceptibilidade à presença de água, com compactação Marshall, de acordo com os resultados do ensaio de dano por umidade, como será apresentado a seguir.

A compactação pelo método Marshall não representa fielmente o que acontece com a mistura que é compactada no campo, na obra, devido tanto à forma quanto à energia empregada. Ou seja, os resultados observados em um pavimento em uso são diferentes da previsão feita no projeto da mistura em laboratório quando adota-se a metodologia Marshall. Para verificar esse efeito, com a distribuição granulométrica definida para as misturas e os teores de ligante encontrados através da metodologia de dosagem Marshall, foram moldados CPs das misturas tipo 0% e 2%, por amassamento, no Compactador Giratório Superpave (CGS), modelo Troxler - 4140, do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) do Departamento de Engenharia de Transporte (DET), da Universidade Federal do Ceará (UFC), mostrado na Figura 4.29.

Houve uma adequação da metodologia de moldagem Superpave para esta pesquisa, que foi a de não submeter as misturas ao processo de envelhecimento em estufa antes da compactação. Isso foi feito para que as características mecânicas das misturas nos diferentes processos de moldagem pudessem ser diretamente comparadas (impacto e amassamento). A permanência da mistura na estufa à temperatura de compactação por um período de 2 horas, no procedimento Superpave, simula o envelhecimento de curto prazo que ocorre durante a usinagem e o transporte até a obra onde a massa asfáltica é compactada. Os ensaios de caracterização mecânica realizados com os CPs foram os mesmos adotados para as misturas moldadas pela metodologia Marshall.



(a) Vista geral do CGS em funcionamento.

(b) Painel de controle do CGS.

Figura 4.29 – Fotos do Compactador Giratório Superpave - LMP/DET/UFC.

A moldagem foi procedida com aplicação de 100 giros no prato do CGS, que corresponde à energia de compactação para um pavimento que terá um tráfego médio a alto, e tensão vertical de 600 kPa, característico de vias principais ou rodovias rurais (BERNUCCI *et al.*, 2006), ângulo de inclinação de 1,25°, e rotação com velocidade de 30 rpm. As dimensões dos CPs foram as mesmas adotadas para o compactador Marshall, ou seja, diâmetro de base 10,0 cm e altura de aproximadamente 6,3 cm, e massa de 1.200 g. Nesta fase da pesquisa foram moldados sessenta (60) corpos-de-prova, sendo 30 CP da mistura 0% e 30 CP da 2%.

O procedimento de moldagem no CGS contemplou as seguintes etapas (Figura 4.30):

- Aquecimento dos agregados e do CAP em estufa até às respectivas temperaturas de mistura;
- Homogeneização da mistura e observação da temperatura de compactação;
- Acomodação da mistura no molde com espátula, sendo 15 golpes na periferia e 10 na região central do CP;
- Compactação do CP no CGS;
- Extração do CP do molde.



(a) Homogeneização da mistura.



(b) Verificação da temperatura de compactação.



(c) Acomodação da mistura no molde.



(d) Desmoldagem do CP.

Figura 4.30 – Processo de moldagem de CP no Compactador Giratório Superpave - LMP/DET/UFC.

Cabe ressaltar que a utilização do CGS na preparação de CP nessa pesquisa deu-se devido à proposta da metodologia Superpave de que a compactação por amassamento se aproxima melhor da obtida no campo (MARQUES, 2004; HUANG, 2004). Nas Figuras 4.31 e 4.32 é possível perceber, visualmente, diferenças entre os CPs moldados com compactação Marshall e com a compactação Superpave, como por exemplo, a maior rugosidade superficial nos CPs Marshall. Essa diferença pode ser percebida também nos parâmetros volumétricos (Tabela 4.13), onde se constata maior densidade aparente, menor Vv, menor VAM e maior RBV, das misturas compactadas no CGS do que com a compactação Marshall. Essas variações são resultantes tanto da forma de compactação (impacto ou amassamento) quanto da energia de compactação que também é diferenciada. Estes aspectos também serão percebidos nos resultados das características mecânicas.

Tabela 4.13 – Parâmetros volumétricos – comparação entre as moldagens.

Parâmetros	0% Marshall	0% Superpave	2% Marshall	2% Superpave	4% Marshall
DMT	2,391	2,391	2,414	2,414	2,415
D _a	2,295	2,379	2,316	2,390	2,334
Vv (%)	4,04	0,50	4,05	1,00	3,37
VAM (%)	17,25	14,21	15,95	13,28	15,37
RBV (%)	76,60	96,45	74,60	92,48	78,09



Figura 4.31 – Comparação visual dos corpos-de-prova moldados pela metodologia Marshall e Superpave - Mistura de referência.

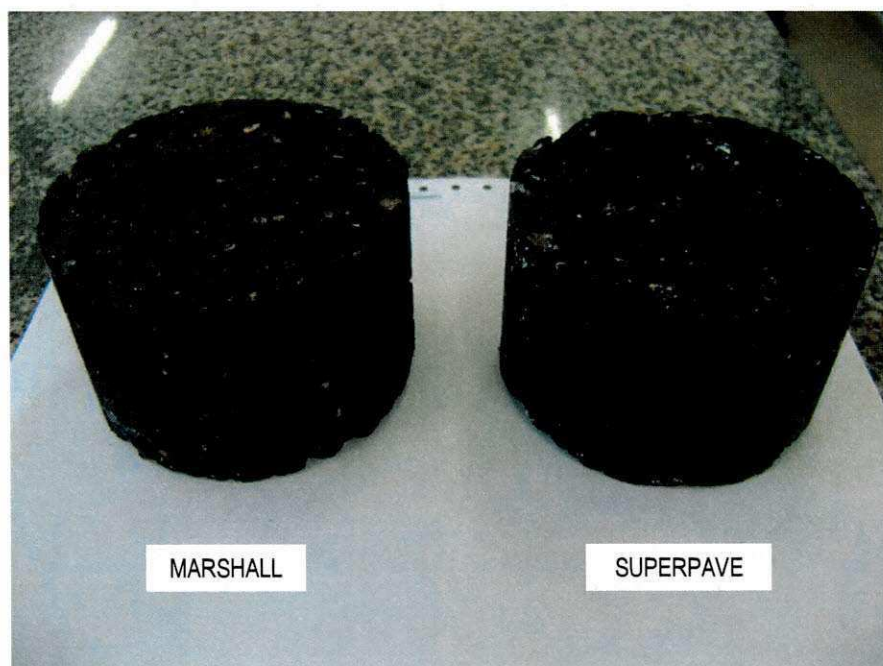


Figura 4.32 – Comparação visual dos corpos-de-prova moldados pela metodologia Marshall e Superpave - Mistura 2%.

CAPÍTULO 5. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

5.1. Programa experimental

O planejamento experimental dessa pesquisa contemplou a caracterização dos materiais que compuseram as misturas, ou seja, Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), agregados graúdos e miúdos, e o resíduo de gesso. Foram realizados o enquadramento dos agregados na faixa granulométrica "C" do DNIT e a dosagem de três misturas de CAUQ através da metodologia Marshall. No processo de dosagem, variaram-se os teores de gesso na mistura para determinação dos parâmetros volumétricos, e do teor de ligante de projeto (TP). O TP foi uma variável espúria, visto que, como houve diferenças do TP entre as misturas, apesar dele não ser diretamente objeto de análise, interferiu na relação entre a quantidade de gesso adicionado e as características mecânicas avaliadas. A estabilidade e a fluência foram medidas em todos os corpos-de-prova (CPs) utilizados na dosagem e também nos TP de cada mistura.

O método Marshall é considerado empírico, visto que o mesmo não possibilita avaliar ou prever as condições do pavimento em serviço, o qual está sujeito ao clima da região e ao tráfego (LUCENA, 2008), além de ser limitado quanto às características mecânicas, que sempre devem ser consideradas em uma estrutura de pavimento. Neste caso, faz-se necessária a avaliação de características da mistura que representem melhor a relação com as solicitações mecânicas de campo.

Assim, a partir dos resultados das dosagens, foram moldados CPs de todas as misturas, com os seus respectivos TP, pela metodologia Marshall (impacto) e das misturas de referência e 2% pela metodologia Superpave (amassamento), para avaliação mecânica. Esse procedimento também permitiu uma comparação entre os resultados de cada método de moldagem.

A caracterização mecânica das misturas foi feita através dos ensaios de resistência à tração estática por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), determinação da vida de fadiga por compressão diametral a tensão controlada (N_f), desgaste por abrasão Cântabro, dano por umidade induzida, e deformação plástica por compressão uniaxial sob carga estática. Na Tabela 5.1 apresenta-se a quantidade de CPs que foram utilizados na realização de todos os ensaios de caracterização mecânica das misturas.

Todos estes ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GeoPav) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

Tabela 5.1 – Quantidade de corpos-de-prova utilizados para dosagem Marshall e ensaios de caracterização mecânica.

Moldagem	Ensaio	Misturas		
		Referência	2% de gesso	4% de gesso
Marshall	Dosagem Marshall	21	15	15
	Estabilidade e Fluência	3	3	3
	Resistência à tração	5	5	5
	Módulo de resiliência	5	5	5
	Fadiga	8	8	8
	Cântabro	3	3	3
	Dano por umidade induzida	5	5	5
	Creep estático	5	5	-
	Sub-total	55	49	44
Superpave	Resistência à tração	5	5	-
	Módulo de resiliência	5	5	-
	Fadiga	8	8	-
	Cântabro	3	3	-
	Dano por umidade induzida	5	5	-
	Creep estático	5	5	-
	Sub-total	31	31	0
Total por mistura		86	80	44
Total geral			210	

5.2. Resistência à tração por compressão diametral

A prensa utilizada nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT) e detalhes da montagem do CP são apresentados na Figura 5.1. A utilização da prensa Marshall elétrica permitiu o controle da velocidade de deformação em torno de $0,8 \pm 0,1$ mm/s durante o ensaio para todos os CPs. A aplicação da carga gerava um deslocamento do anel dinamométrico, e, por conseguinte, do relógio comparador (extensômetro). A ruptura era registrada sempre que se observava a diminuição no valor da carga necessária para manter o prato da prensa se deslocando na velocidade de deformação definida. A leitura no extensômetro, no instante da ruptura, foi multiplicada pela constante do anel dinamométrico da prensa para obtenção do valor da carga de ruptura. A constante do anel dinamométrico da prensa utilizada na pesquisa é igual a 1,912 kgf/div.



(a) Vista geral da prensa.



(b) Arranjo do CP durante o ensaio.

Figura 5.1 – Montagem do CP na prensa para ensaio de RT.

Os CPs ensaiados foram moldados em laboratório e submetidos a um condicionamento prévio mínimo de 4 horas à temperatura de 25 °C. Foram cinco (5) CPs exclusivos para a determinação da RT, ou seja, não submetidos antes pelo ensaio de MR, para cada uma das misturas 0%, 2% e 4% com compactação Marshall, e 0% e 2% compactadas com o CGS, portanto, um total de 25 CPs, com os TP encontrados segundo os procedimentos de dosagem do método Marshall. Os resultados de cada um desses ensaios, a média aritmética e o desvio padrão estão mostrados na Tabela 5.2. Os valores de RT média de cada mistura podem ser visualizados graficamente na Figura 5.2. Detalhes no Anexo C.

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de resistência à tração indireta.

Compactação Marshall										
Mistura	Vv (%)	CAP (%)	Observação (MPa)					Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
			1	2	3	4	5			
0%	4,04	5,95	0,992	1,033	0,910	0,975	0,932	0,968	0,049	5,02
2%	4,05	5,31	0,868	0,837	0,764	0,808	0,900	0,835	0,053	6,30
4%	3,37	5,31	0,873	0,940	0,933	0,995	0,842	0,917	0,060	6,57
Compactação Superpave										
Mistura	Vv (%)	CAP (%)	Observação (MPa)					Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
			1	2	3	4	5			
0%	0,50	5,95	1,145	1,156	1,223	1,169	1,200	1,178	0,032	2,73
2%	1,00	5,31	1,239	1,310	1,271	1,288	1,322	1,286	0,033	2,57

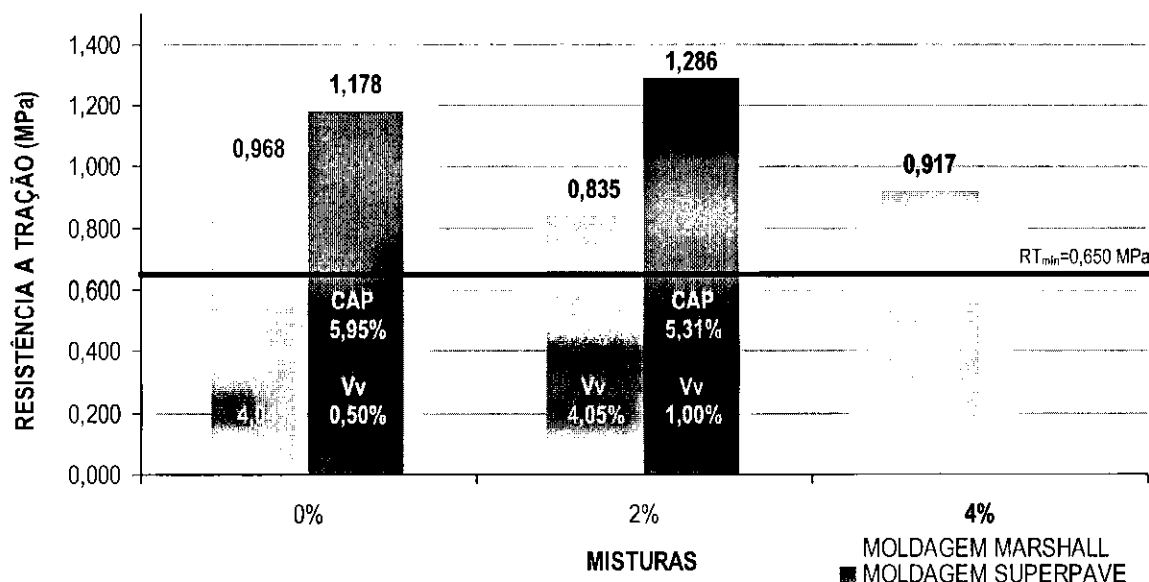


Figura 5.2 – Valores médios de RT em função do percentual de gesso na mistura.

Todas as misturas apresentaram valores de resistência à tração por compressão diametral estática superiores ao mínimo exigido pela especificação de serviço de concreto asfáltico para pavimentos flexíveis do DNIT (2006a), que é de 0,650 MPa para misturas na faixa “C”, às quais são aplicadas em camada de rolamento ou de ligação (binder). Os valores encontrados estão no intervalo de 0,8 a 1,4 MPa e estão compatíveis com valores típicos de misturas asfálticas a quente recém-moldadas, que são da ordem de 0,5 a 2,0 MPa (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Levando-se em consideração apenas os CPs moldados na metodologia Marshall, era de esperar que, como o ligante lubrifica o intertravamento entre os agregados, com a diminuição do teor de ligante e a presença do resíduo de gesso como filer, alterando a consistência do ligante, houvesse um acréscimo na RT nas misturas 2% e 4% (CASTELO BRANCO, 2004). No entanto, percebeu-se que o valor da RT na mistura de referência superou a RT nas misturas 2% e 4%. A redução da resistência à tração com a diminuição do teor de CAP pode ser atribuída à presença do cascalho, que é um seixo britado, e por isso tem baixa aderência ao ligante (adesividade), seja por sua rugosidade, seja por sua composição química (material silicoso). Estes resultados são análogos aos obtidos por Souza (2007), quando esse autor analisou a resistência à tração de misturas asfálticas com aplicação de seixos. Apesar disto, observa-se que, isolando-se as misturas 2% e 4%, ocorre o aumento na RT, da ordem de 10%, com o aumento do teor de gesso, devendo-se este acréscimo à ação do gesso como um filer ativo, que alterou a consistência do ligante no mástique ao agregado.

Para as misturas compactadas com o CGS, houve um aumento nos valores de RT com relação às mesmas misturas moldadas segundo o procedimento Marshall, sendo de 22% na mistura de referência e de 54% na mistura 2%. Percebe-se, também, apesar do maior teor de ligante na mistura de referência, que a RT de 0% Superpave é menor que a RT de 2% Superpave, sugerindo que, apesar da presença do cascalho, na moldagem por amassamento, a atividade do gesso teve influência como elemento de aumento da consistência do ligante no mástique, e que a redução do teor de ligante contribuiu na diminuição da lubrificação entre os agregados. Os coeficientes de variação das moldagens Superpave foram menores que os obtidos com os CPs moldados pela metodologia Marshall, mas, todas apresentaram coeficiente de variação menor que 10%.

Considerando a diferença no teor de ligante, a resistência à tração das misturas aumentou com a adição de resíduo gesso, com exceção da diferença entre as misturas Marshall de referência e 2%. De forma semelhante, Cavalcante & Soares (2001) haviam concluído que ao aumentar o teor de filer nas misturas asfálticas, os valores da resistência à tração estática também aumentam. No entanto, espera-se que um aumento maior da quantidade do resíduo, que o da mistura 4%, aumente a RT até um limite, quando começa a separar as partículas de maiores diâmetros, prejudicando a compactação da mistura e comprometendo a RT.

5.3. Módulo de resiliência

O equipamento utilizado para determinar os valores de MR foi o Sistema Integrado de Ensaio para Misturas Betuminosas e Solos (SIEMBS), fabricado pela empresa Armtec Tecnologia em Robótica, adquirido em 2008 pelo GeoPav. O SIEMBS é composto da seguinte aparelhagem: 1) módulo de ensaio, onde estão: a iluminação interna; sistema de climatização quente/frio; sistema de exaustão de ar e gases; sistema de movimentação da tampa; e isolamento acústico/térmico; e 2) módulo de controle, onde estão: todo sistema pneumático; o módulo elétrico/eletrônico de controle; e o computador, no qual está instalado o sistema de controle e aquisição de dados.

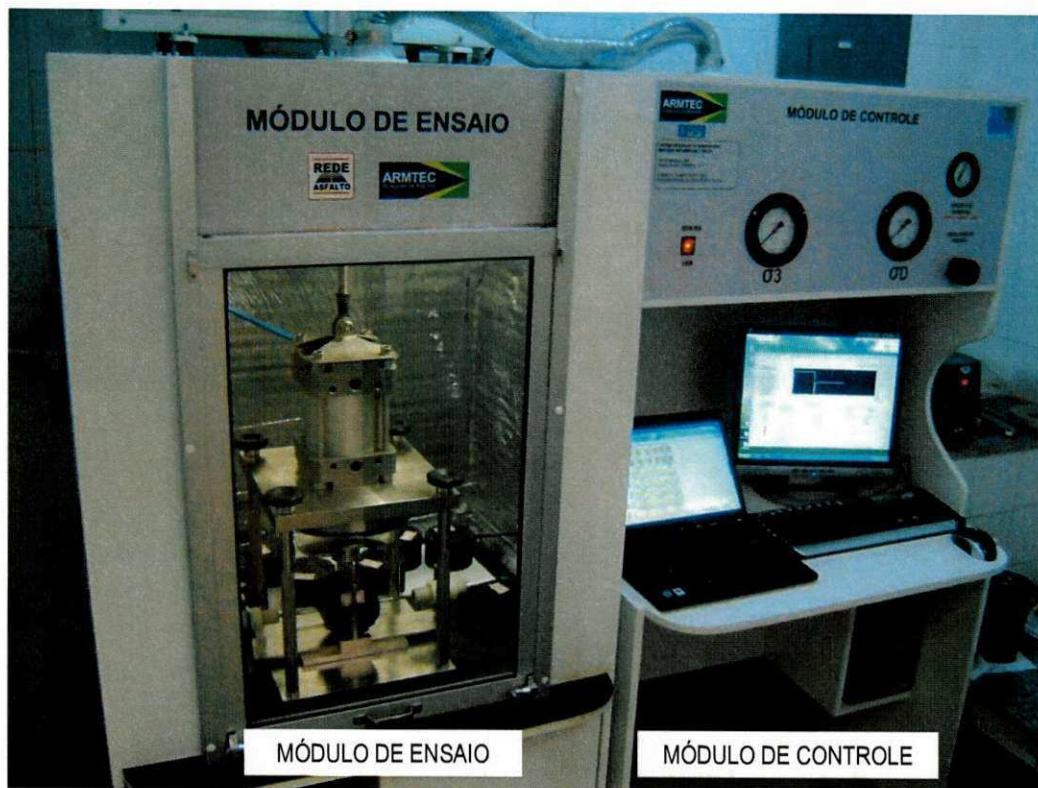
Nessa pesquisa, o MR foi determinado conforme o método DNER-ME 133/94 (DNER, 1994d). O procedimento de ensaio empregado está resumido da seguinte forma:

- Condicionamento dos CPs a 25 °C durante período mínimo de 4 horas;

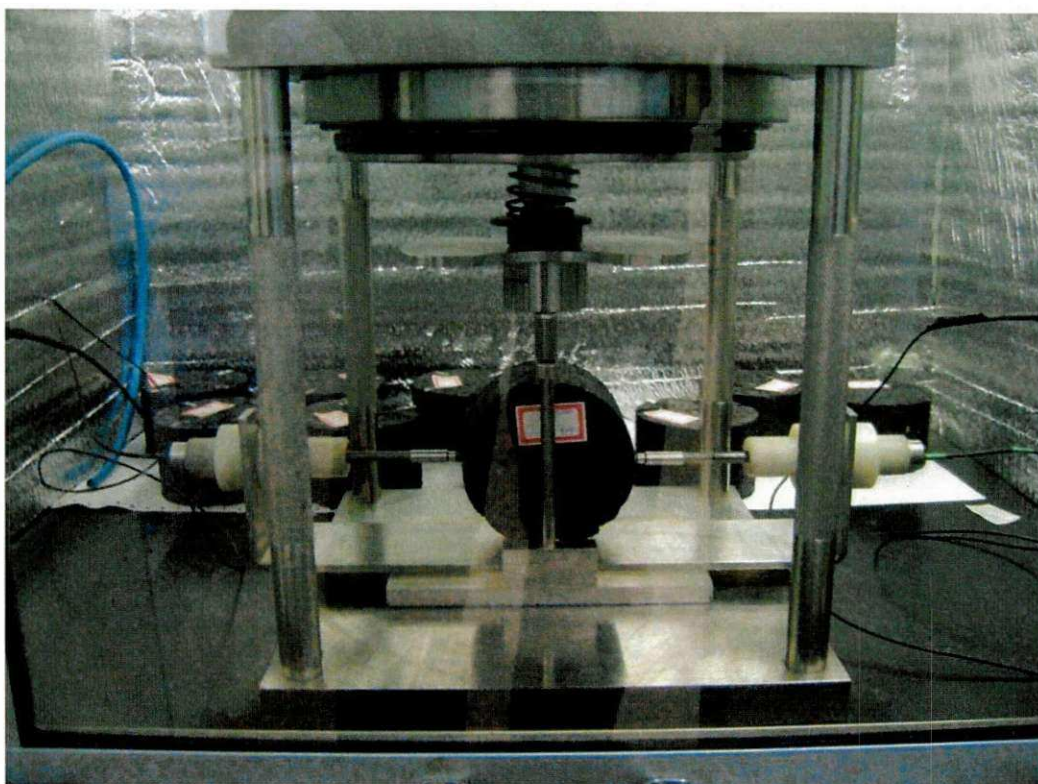
- Posicionamento do CP na estrutura de suporte do módulo de ensaio do SIEMBS, encaixando-o entre os frisos;
- Assentamento do pistão de carga sobre o friso superior e fixação com os parafusos nas hastes de suporte;
- Fixação e ajuste dos sensores para medição de deslocamento linear, ou *linear variable differential transformers* (LVDTs), de modo a obter leituras iniciais adequadas na tela do módulo de controle;
- Condicionamento dos CPs, aplicando uma carga vertical repetida diametralmente crescente até que se estabilize, por dez ciclos de carregamento, em torno de uma deformação horizontal pré-estabelecida, chamada de sensibilidade, ou um limite de 200 ciclos.
- Após o condicionamento, o ensaio começa de imediato. O valor do módulo de resiliência é calculado pela média dos valores obtidos a 300, 400 e 500 aplicações de carga.

No condicionamento e no ensaio, a força aplicada deve ser limitada a uma tensão de no máximo 30% da resistência à tração estática, caso contrário, o CP pode romper por fadiga durante o ensaio. Por isso, a sensibilidade de deformação adotada para o condicionamento dos corpos-de-prova foi de 0,002 mm, pois, em ensaios preliminares foi observado que valores maiores de sensibilidade provocavam a ruptura prematura dos CPs, ou seja, antes da conclusão do ensaio. Bernucci *et al.* (2006) recomendam uma sensibilidade mínima de $2,5 \cdot 10^{-4}$ mm. A carga foi aplicada a uma frequência de 60 ciclos por minuto, ou seja, 1 Hz. Cada ciclo de carregamento tem duração de 0,1 s, seguido de um repouso de 0,9 s, durante o condicionamento e o próprio ensaio. O coeficiente de Poisson adotado para as misturas foi 0,30, e a temperatura durante o ensaio foi 25 °C.

Na Figura 5.3 tem-se uma visão do SIEMBS e detalhes da montagem do CP durante o ensaio de MR. As Figuras 5.4 a 5.6 mostram as telas de configuração, acompanhamento e de resultados do ensaio, capturadas do programa computacional desenvolvido para o SIEMBS.



(a) Vista geral do equipamento SIEMBS.



(b) Foto de um CP durante o ensaio de módulo de resiliência.

Figura 5.3 – Equipamento para ensaio do módulo de resiliência de misturas asfálticas UFS/DEC/GEOPAV.

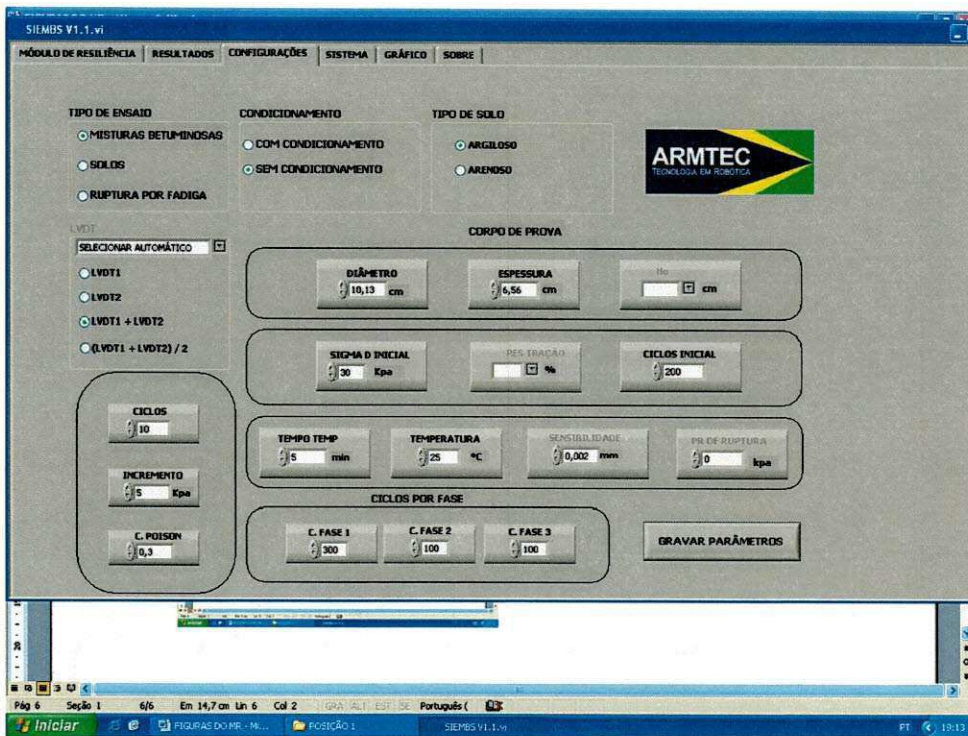


Figura 5.4 – Tela de configurações para ensaio de MR do sistema de aquisição de dados do SIEMBS/UFS.

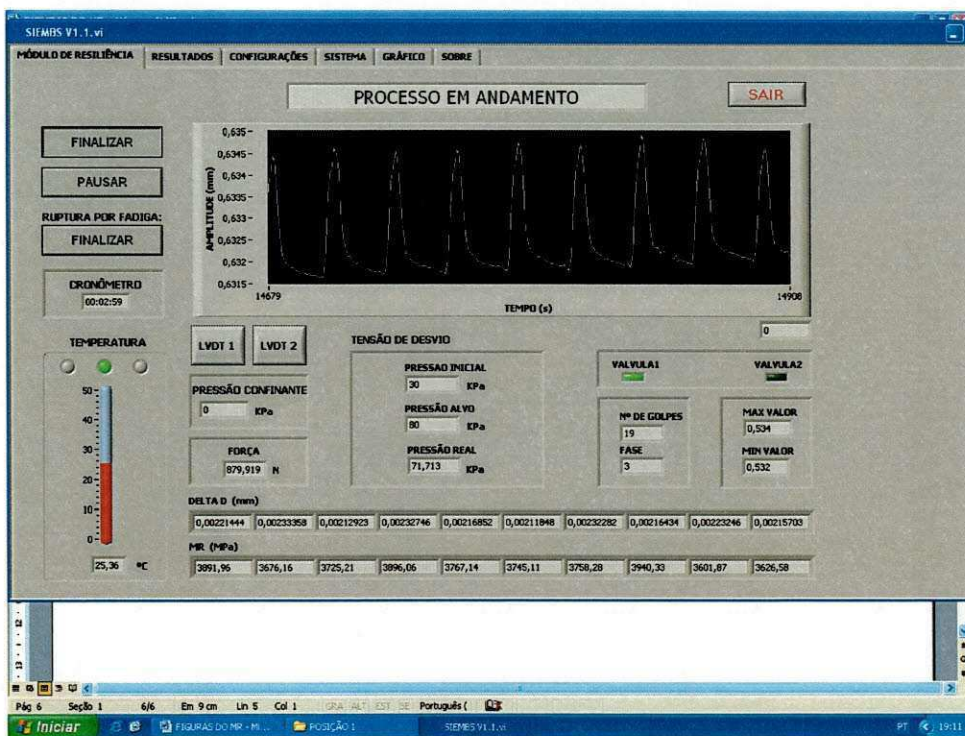


Figura 5.5 – Tela de monitoramento do ensaio de MR em andamento do sistema de aquisição de dados do SIEMBS/UFS.

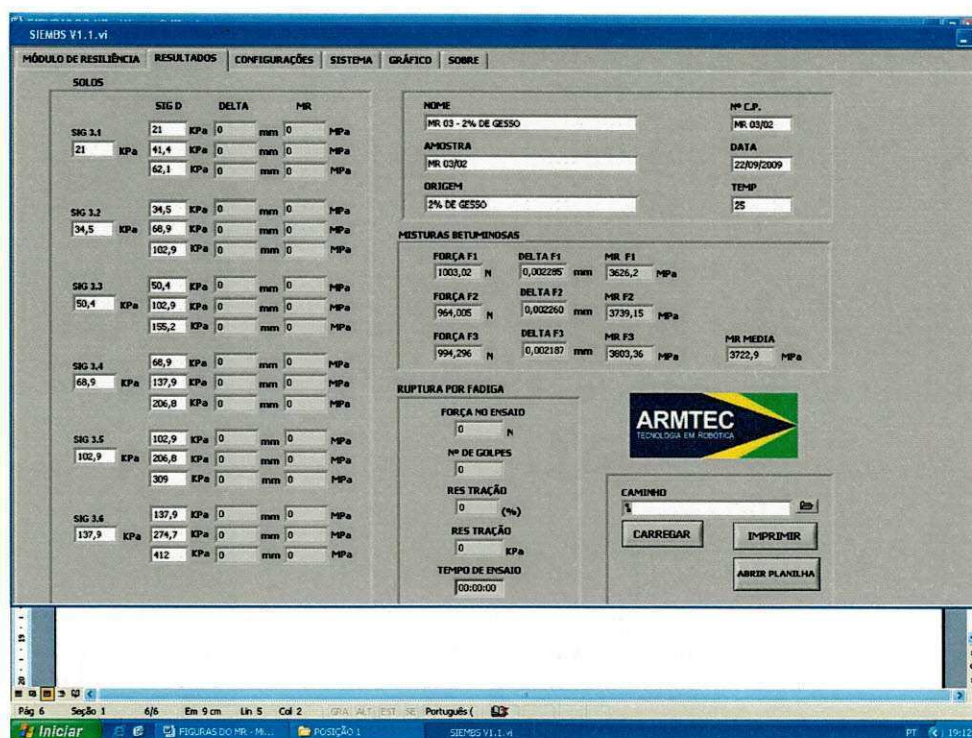


Figura 5.6 – Tela de resultados do ensaio de MR em andamento do sistema de aquisição de dados do SIEMBS/UFS.

De forma análoga aos ensaios de RT, cada mistura teve 5 CPs exclusivos analisados, em duas direções perpendiculares, perfazendo 25 CPs e 50 determinações de MR. No Anexo D apresentam-se detalhes dos resultados de todos os CPs, como os valores obtidos a 300, 400 e 500 aplicações de carga, nas duas direções. O valor do MR de cada amostra foi obtido pela média do MR nas duas posições. Os resultados de cada CP, a média aritmética e o desvio padrão, estão apresentados na Tabela 5.3. Os valores médios de cada mistura podem ser visualizados graficamente na Figura 5.7.

Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência.

Compactação Marshall										
Mistura	Vv (%)	CAP (%)	Observação (MPa)					Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
			1	2	3	4	5			
0%	4,04	5,95	2827,89	2270,12	2149,15	2174,42	2682,45	2420,80	312,81	12,92
2%	4,05	5,31	4259,01	3751,20	3656,28	2771,29	3593,21	3606,20	535,47	14,85
4%	3,37	5,31	4173,98	3695,16	3398,12	3004,37	3265,94	3507,52	448,01	12,77

Compactação Superpave										
Mistura	Vv (%)	CAP (%)	Observação (MPa)					Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
			1	2	3	4	5			
0%	0,50	5,95	2305,03	2290,98	2284,74	2451,30	2616,14	2389,64	144,05	6,03
2%	1,00	5,31	2488,99	2699,70	2617,29	2488,43	2454,18	2549,72	104,44	4,10

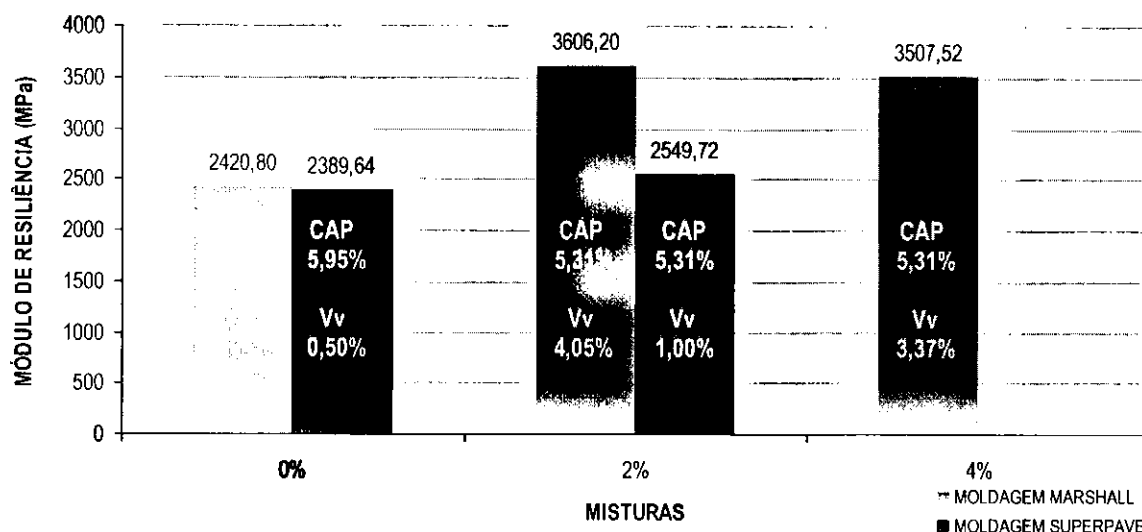


Figura 5.7 – Valores de MR em função do percentual de gesso nas misturas.

Observa-se da Tabela 5.3 e Figura 5.7 que as misturas que incluem gesso em sua composição apresentaram maiores valores de MR. Esse acréscimo foi mais evidente nas misturas moldadas com compactação Marshall. A mistura 2% moldada com compactação Marshall teve o maior valor de MR, 3606,20 MPa, no entanto, maior coeficiente de variação (14,85%). Além da influência do gesso como material de enchimento, que por si só aumentaria a rigidez das misturas, esses resultados estão vinculados à diferença do teor de ligante entre as misturas, tornando as misturas com gesso ainda mais rígidas. De acordo com Cavalcante & Soares (2001), quanto maior a concentração de filer relativa à quantidade de asfalto, mais rígida será a mistura, no entanto, existe uma determinada concentração, denominada crítica, a partir da qual a rigidez começa a comprometer a vida de fadiga.

Os valores de MR na moldagem Superpave foram menores que na moldagem Marshall, principalmente na mistura 2%, onde houve uma redução de 29%. De acordo com Marques (2004), existem diferenças no valor de MR quando se utiliza diferentes tipos de compactação (impacto e amassamento), e também quando é aplicada uma energia de compactação diferente. As misturas com gesso apresentaram-se mais flexíveis, quando com moldagem Superpave. Os CPs moldados com o CGS obtiveram menores coeficientes de variação que na moldagem Marshall.

5.4. Relação entre módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT)

Para efeitos comparativos, na Tabela 5.4 apresenta-se um resumo dos resultados de MR, RT e MR/RT obtidos por outros autores para CAUQ na faixa "C" (BERNUCCI *et al.*, 2006), enquanto na Tabela 5.5 estão mostrados os resultados obtidos nesta pesquisa. Os valores de MR e MR/RT podem ser visualizados em forma de gráfico na Figura 5.11.

Tabela 5.4 – Módulos de resiliência, resistência e MR/RT de misturas investigadas no país (25 °C).

Características	Publicação	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
Concreto asfáltico – CAP 30/45	Soares <i>et al.</i> (2000)	3628	1,09	3346
Concreto asfáltico – CAP 50/60	<i>apud</i> Bernucci <i>et al.</i>	3033	0,89	3425
Concreto asfáltico – CAP 85/100	(2006)	1488	0,44	3376
Concreto asfáltico 1 (moldagem na usina)	Rede asfalto (2005)	2651	0,85	3119
Concreto asfáltico 2 (moldagem na usina)	<i>apud</i> Bernucci <i>et al.</i>	2297	0,67	3428
Concreto asfáltico 1 (moldagem no laboratório)	(2006)	3609	1,26	2864
Concreto asfáltico 2 (moldagem no laboratório)		3026	1,23	2460
Concreto asfáltico de referência		3200	1,20	2667
Concreto asfáltico com 10% de fresado	Lima (2003) <i>apud</i>	4776	1,30	3674
Concreto asfáltico com 30% de fresado	Bernucci <i>et al.</i> (2006)	7524	1,30	5787
Concreto asfáltico com 50% de fresado		8901	1,60	5663
Concreto asfáltico de referência		3647	0,97	3760
Asfalto-borracha (via úmida)	Pinheiro (2004) <i>apud</i>	2393	0,50	4786
Asfalto-borracha (via seca)	Bernucci <i>et al.</i> (2006)	2452	0,80	3065

Tabela 5.5 – Módulos de resiliência, resistência à tração e MR/RT das misturas estudadas (25 °C).

Misturas	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
Concreto asfáltico de referência – moldagem Marshall	2420,80	0,968	2499,90
Concreto asfáltico com 2% de gesso – moldagem Marshall	3606,20	0,835	4317,35
Concreto asfáltico com 4% de gesso – moldagem Marshall	3507,52	0,917	3826,32
Concreto asfáltico de referência – moldagem Superpave	2389,64	1,178	2027,74
Concreto asfáltico com 2% de gesso – moldagem Superpave	2549,72	1,286	1982,47

Na moldagem Marshall as misturas 2% e 4% apresentaram maiores valores de MR/RT que a mistura de referência, sendo os acréscimos de 73% e 53%, respectivamente, comprovando o aumento da rigidez das misturas, pela diminuição do TP e pela adição de gesso. O maior valor de MR/RT foi o da mistura 2% com moldagem Marshall. Como as misturas com moldagem Superpave tiveram maior RT e menor MR que na moldagem Marshall, estas apresentaram, conseqüentemente, menores valores da relação MR/RT. Em geral, as misturas com moldagem Marshall apresentaram resultados próximos aos da literatura, ao passo que os valores obtidos com CPs da moldagem Superpave, dado os baixos Vv obtidos com a compactação por amassamento, foram menores (Tabela 5.4).

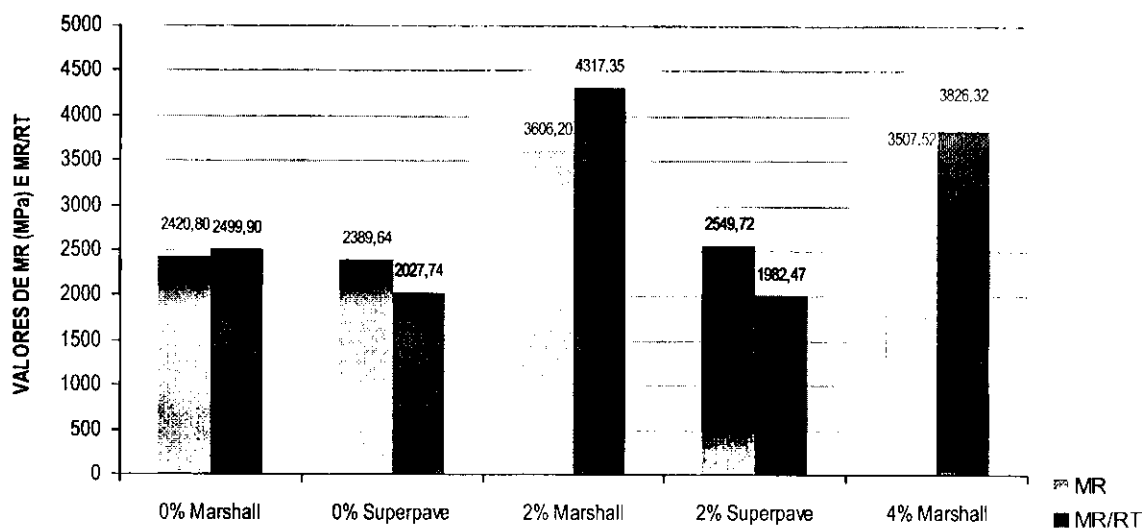


Figura 5.8 – Valores de MR e MR/RT em função do percentual de gesso nas misturas estudadas.

5.5. Fadiga por compressão diametral sob tensão controlada

Algumas técnicas de ensaio de fadiga empregadas em pesquisas brasileiras utilizam-se principalmente de arranjos com vigotas em flexão, flexão em amostras trapezoidais ou tração indireta por compressão diametral (BALBO, 2007). O arranjo do ensaio utilizado nesta pesquisa para determinação da vida de fadiga em CPs cilíndricos é semelhante ao ensaio de resistência à tração ou de módulo de resiliência. Isso porque ele gera uma zona tracionada perpendicular ao plano de aplicação da carga, que é a mesma zona de fratura quando o CP é levado à ruptura no ensaio de resistência à tração, ou quando atinge a fadiga. Portanto, as seções horizontais do corpo-de-prova sofrem esforços de compressão enquanto as seções verticais ficam submetidas à tração (Figura 5.9). São aplicadas cargas repetidas que produzem entre 10% e 50% da tensão de ruptura estática (RT), a uma frequência de 1 Hz, com 0,1 s de duração do carregamento, 0,9 s de intervalo entre as aplicações de carga. O ensaio é realizado à temperatura controlada (MEDINA & MOTTA, 2005).

Como os ensaios de MR, os ensaios de fadiga também foram realizados no SIEMBS. Nesse equipamento, o critério de fadiga dos CPs era o rompimento da amostra, ou seja, o ensaio terminava quando se dava a ruptura total da amostra, resultando o número N de aplicações de carga. Como o SIEMBS não interrompia automaticamente o ensaio com o rompimento do CP, os ensaios eram filmados para que pudesse ser resgatado, pós-processando o arquivo com as imagens do ensaio, o registro do número de golpes que levou o CP à fadiga. Na Figura 5.10, mostra-se a posição da câmera

durante o ensaio, e na Figura 5.11, tem-se a imagem do monitor do SIEMBS durante o ensaio onde aparecem o software de aquisição de dados do SIEMBS, a imagem, em tempo real, do CP, e o software que grava o número de golpes e a imagem do CP até o rompimento.



Figura 5.9 – Foto do arranjo do CP durante o ensaio de vida de fadiga por compressão diametral sob tensão controlada.

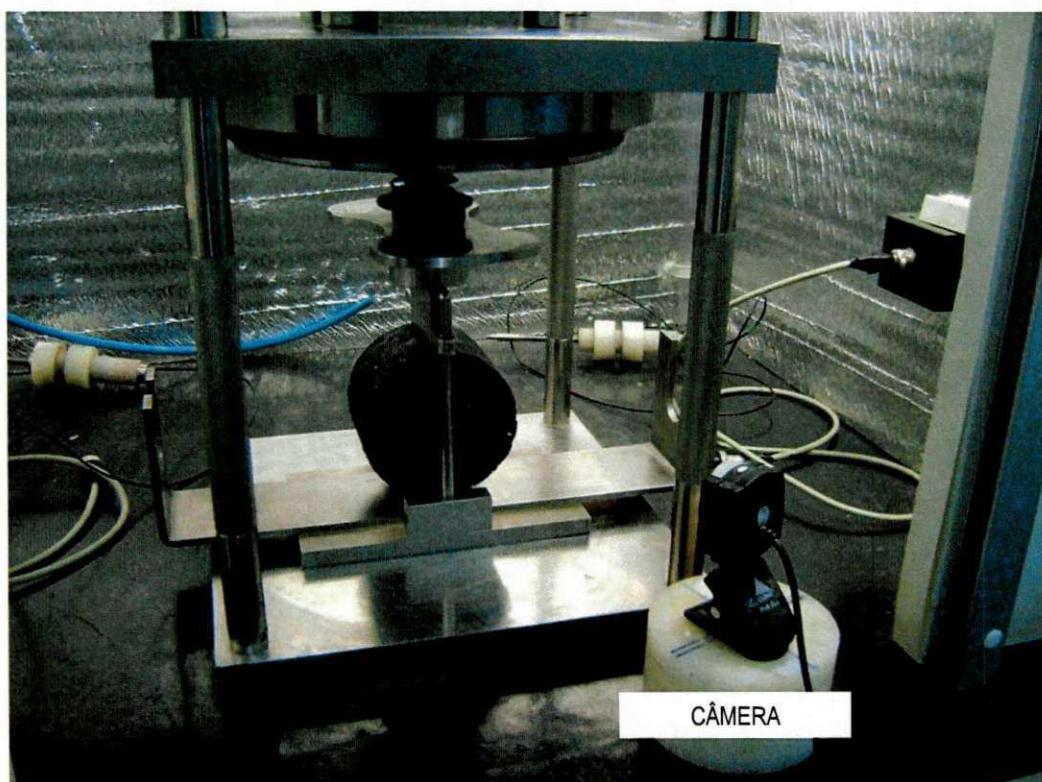


Figura 5.10 – Posição da câmera durante o ensaio de fadiga.

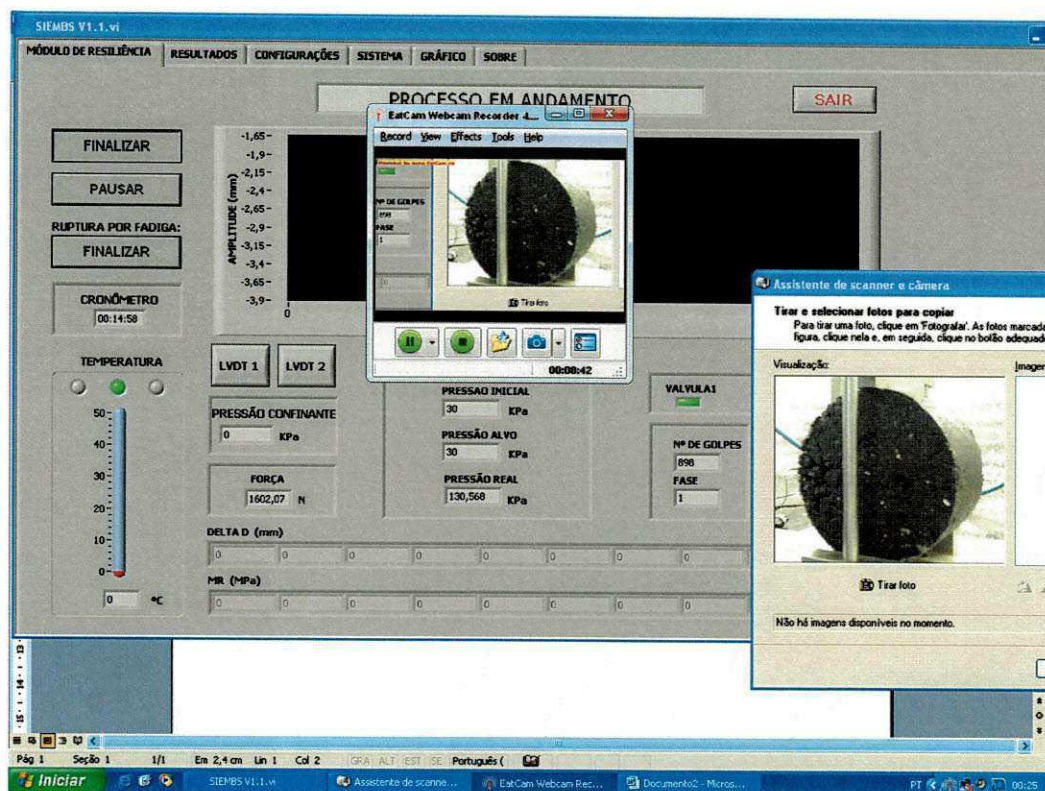


Figura 5.11 – Tela de acompanhamento do ensaio de fadiga do sistema de aquisição de dados do SIEMBS/UFS com auxílio de outros aplicativos.

Para cada mistura, determinou-se a relação entre o número N_f , que é a vida de fadiga, e a diferença entre a tensão de tração e compressão repetida solicitante. Portanto, o modelo que representa a vida de fadiga das misturas nesta pesquisa é da forma da Equação 5.1.

$$N_f = K_2 \cdot \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_2} \quad (5.1)$$

Onde: N_f : vida de fadiga;

$\Delta\sigma$: diferença entre as tensões de tração e compressão no centro do CP (Figura 2.11);

K_2, n_2 : constantes determinadas a partir dos resultados de laboratório.

As tensões adotadas no estudo para todas as misturas foram 10%, 20%, 30% e 50% da RT, com exceção da mistura 2% com moldagem Superpave, que foram de 10%, 20%, 30% e 40%, pois o equipamento não suporta a aplicação repetida da tensão referente a 50% da RT dessa mistura que tem

a maior RT desta pesquisa. Foram ensaiados dois (2) CPs por nível de tensão, sendo oito (8) por mistura, totalizando quarenta (40) CPs ensaiados.

O gráfico apresentado na Figura 5.12 apresenta o comportamento das misturas quanto à fadiga. Os valores das constantes K_2 e n_2 , assim como o coeficiente de determinação dos modelos estão apresentados na Tabela 5.6.

Os resultados obtidos dos ensaios de fadiga mostram que, para uma mesma tensão, no intervalo de tensões estudado, as misturas que receberam a adição do resíduo tiveram incremento crescente na vida de fadiga com o aumento da quantidade de gesso. Na moldagem Marshall, a mistura 4% apresentou a maior vida de fadiga, seguida pela mistura 2%. O incremento da resistência à fadiga foi maior na mistura 4%, com relação a 2%, do que na 2% com relação à de referência. Na moldagem Superpave, a mistura com gesso também apresentou maior resistência que a sem gesso, sendo que o incremento observado entre as misturas essas misturas foi maior que na moldagem Marshall. As misturas com moldagem Superpave, que apresentavam menor valor de MR/RT, apresentaram vida de fadiga maior que todas as misturas moldadas pela metodologia Marshall. Assim, tanto a adição de gesso quanto a distribuição dos grãos e a diminuição do volume de vazios nas misturas obtidas pela moldagem Superpave, aumentaram a resistência à fadiga. Vasconcelos (2004) observou uma tendência de maior vida de fadiga das misturas dosadas pela metodologia Superpave com relação a dosagem Marshall, que pode ser influência da distribuição dos agregados obtida durante o processo de compactação, e também do processo de envelhecimento de curto prazo adotado em sua pesquisa.

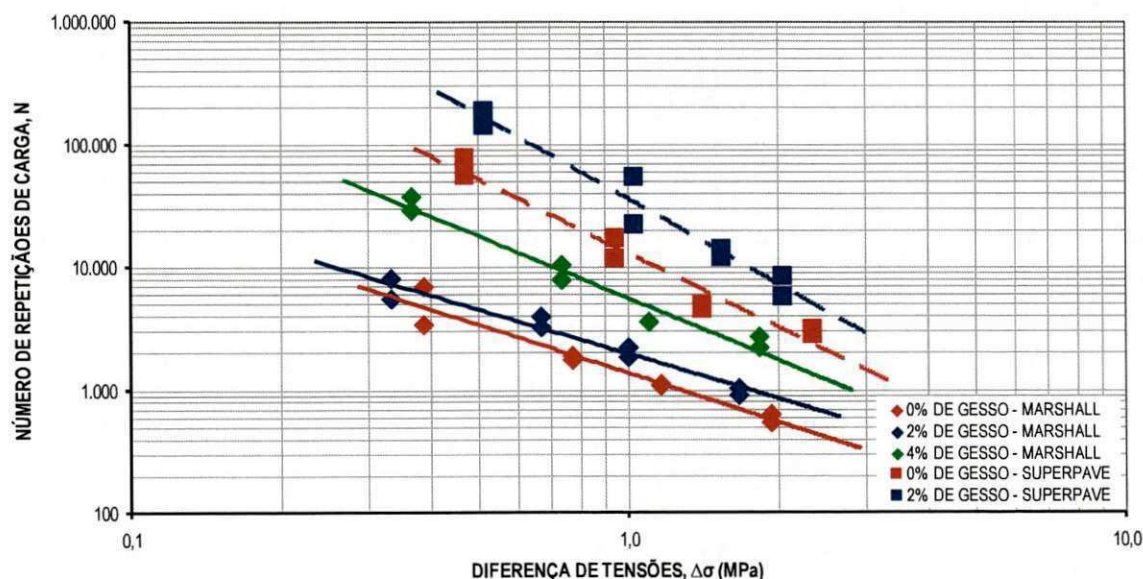


Figura 5.12 – Vida de fadiga versus diferença de tensões.

Tabela 5.6 – Valores de K_2 , n_2 e do coeficiente de determinação (R^2) do modelo de vida de fadiga.

Mistura	K_2	n_2	R^2
Referência – moldagem Marshall	1372,1	1,3136	0,945
2% – moldagem Marshall	1965,4	1,2003	0,958
4% – moldagem Marshall	5593,5	1,6758	0,957
Referência – moldagem Superpave	12901,0	1,9892	0,959
2% – moldagem Superpave	35717,0	2,288	0,957

Apesar do equipamento de ensaio ser do tipo pneumático, da falta do controle da temperatura pelo equipamento durante o ensaio (esse controle era feito pela regularização da temperatura ambiente do laboratório), da variabilidade do valor da resistência à tração entre CPs, e do critério de parada do ensaio, que foi o rompimento total do CP, o ajuste dos experimentos aos modelos de fadiga apresentaram valores dos coeficientes de determinação (R^2) da ordem de 0,95.

Segundo Vasconcelos (2004), alguns pesquisadores defendem que quanto menor a relação MR/RT, maior será a vida de fadiga da mistura. Isso foi verificado nesta pesquisa, uma vez que se percebeu a tendência de que, as misturas com menores valores de MR/RT, apresentaram maior resistência à fadiga em todas as misturas.

5.6. Desgaste de misturas betuminosas por abrasão – ensaio Cântabro

O procedimento utilizado para avaliação do desgaste por abrasão foi o indicado no método de ensaio DNER – ME 383/99 (DNER, 1999b), que, apesar de ter sua aplicação voltada para misturas porosas, ou abertas, pode apresentar resultados relevantes nessa pesquisa quanto à avaliação da variação da quantidade de gesso na mistura. Nesta pesquisa foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, de acordo com as metodologias Marshall e Superpave, nos teores de projeto definidos pela dosagem Marshall das misturas estudadas. Após pesagem e condicionamento mínimo de 4 horas à temperatura de 25 °C, os CPs foram submetidos, individualmente, a 300 revoluções no equipamento de abrasão *Los Angeles*, a 33 rpm, sem as esferas metálicas. Ao final da aplicação das rotações, as amostras foram novamente pesadas (Figura 5.13).



(a) Pesagem do CP antes do desgaste.



(b) Pesagem do CP após o desgaste.

Figura 5.13 – Aspectos de uma amostra de CAUQ antes e após o ensaio de desgaste Cântabro.

O valor do desgaste de cada amostra é obtido a partir da relação entre a diferença de massa do CP, no início e no final do ensaio, e a massa inicial da amostra, conforme a Equação 5.11. A temperatura durante o ensaio também foi controlada no ambiente do laboratório ($25 \pm 1^\circ \text{C}$).

$$A = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad (5.11)$$

Onde: A: desgaste da mistura betuminosa, com aproximação de 1% (%);

P_i : massa do corpo-de-prova antes do ensaio (g);

P_f : massa do corpo-de-prova após do ensaio (g);

O valor do desgaste por abrasão de cada tipo de mistura foi a média aritmética de três amostras que não diferiram mais de 20% do valor médio. Na Figura 5.14, também são observadas características assumidas pelos CPs antes e após o ensaio.

Para misturas de pré-misturado a quente (PMQ), com asfalto polímero, para utilização como camada porosa de atrito, o limite do desgaste aceitável é de 25%, conforme a norma DNER – ES

386/99 (DNER, 1999a). Com a utilização desse ensaio na pesquisa, buscou-se verificar se a adição de resíduo de gesso altera de forma significativa o comportamento da mistura quanto à desagregação.



(a) CP antes do ensaio.



(b) CP após o ensaio.



(c) Aspecto das amostras sem gesso após o ensaio.



(d) Aspecto das amostras com 2% de gesso após o ensaio.



(e) Aspecto das amostras com 4% de gesso após o ensaio – Moldagem Marshall.

Figura 5.14 – Aspecto dos CPs antes e após o ensaio de desgaste Cântabro.

Na Tabela 5.7 e na Figura 5.15 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de perda de massa por desgaste Cântabro.

Tabela 5.7 – Resultados do ensaio Cântabro.

Moldagem Marshall							
Mistura	Observação	P _i (g)	P _f (g)	Desgaste (%)	Média (%)	Desvio padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
0%	1	1174,45	1122,49	4	5	1,15	23,09
	2	1175,41	1126,35	4			
	3	1191,58	1121,02	6			
2%	1	1167,69	1084,35	7	8	1,00	12,50
	2	1177,96	1077,20	9			
	3	1173,49	1083,01	8			
4%	1	1186,92	1093,63	8	8	0,00	0,00
	2	1183,01	1083,80	8			
	3	1188,50	1095,46	8			

Moldagem Superpave							
Mistura	Observação	P _i (g)	P _f (g)	Desgaste (%)	Média (%)	Desvio padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
0%	1	1187,80	1125,12	5	5	0,58	11,55
	2	1191,75	1126,57	5			
	3	1184,26	1136,60	4			
2%	1	1193,37	1104,18	7	6	1,00	16,67
	2	1190,38	1114,66	6			
	3	1186,24	1121,43	5			

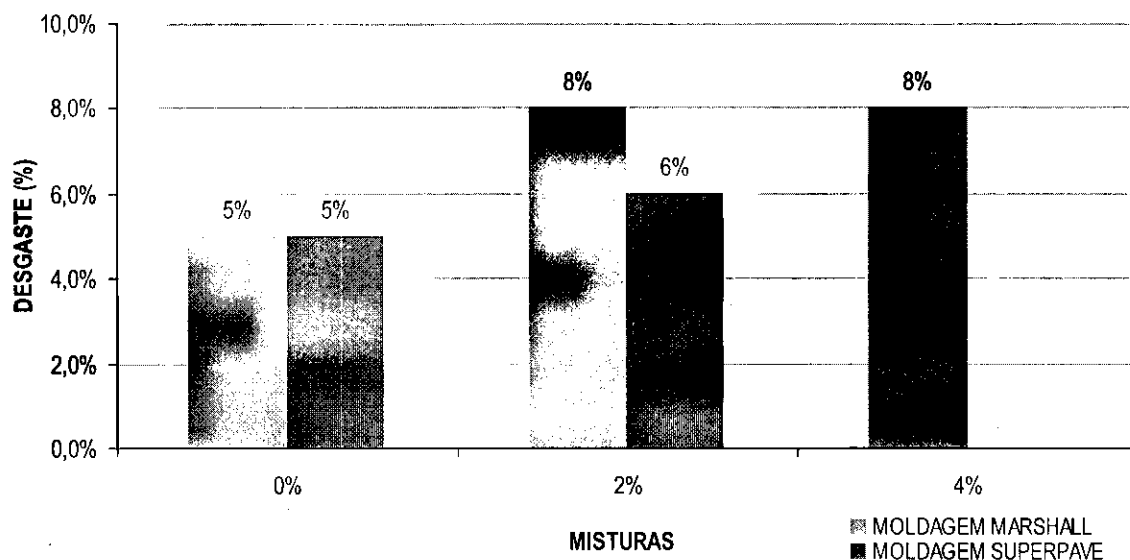


Figura 5.15 – Valores do desgaste obtido no ensaio de Cântabro em função do percentual de gesso nas misturas.

Observa-se que as misturas com adição de gesso sofreram maior desgaste que a mistura referência, porém, isso pode estar relacionado à diferença entre os teores de ligante (5,95% de CAP na mistura de referência e 5,31% de CAP nas misturas 2% e 4%). As misturas sem gesso apresentaram o mesmo desgaste, tanto na moldagem Marshall como na Superpave, já a mistura com gesso, cujos CPs receberam compactação Superpave, experimentou um desgaste menor que os CPs com moldagem Marshall. Apesar das misturas com gesso terem apresentado maiores desgastes, todas as misturas tiveram perda de massa inferior ao limite máximo preconizado pela norma DNER-ME 383/99 (DNER, 1999b).

5.7. Efeito deletério da água

A norma de ensaio ASTM D 4867 (ASTM, 1996) é usada para testar o potencial de dano por umidade induzida em misturas de concreto asfáltico, além da eficácia de aditivos que possam diminuir os efeitos da umidade na mistura. Segundo Furlan (2006), devido ao tipo de condicionamento ao qual são submetidas às misturas asfálticas, os resultados dos ensaios realizados segundo a ASTM D 4867 associam o dano por umidade à idade de 0 a 4 anos para o pavimento. Por isso, esse ensaio é classificado como ensaio de dano por umidade em curto prazo ou de baixa severidade. Esse foi o método utilizado nesta pesquisa.

O procedimento de ensaio ASTM D 4867 prevê a possibilidade de uma variação no condicionamento dos CPs, qual seja, a de submetê-los, a um ciclo de congelamento por 15 horas à -18 ± 2 °C, e após, um período em banho de 24 horas à 60 ± 1 °C. No entanto, o congelamento do revestimento de pavimentos no Brasil é um evento raro, restrito a poucas localidades e épocas do ano, além disso, a validade do ciclo de congelamento tem sido questionada e pesquisadores defendem que a imersão pode ter efeito governante na perda de resistência da mistura (FURLAN, 2006). Por isso não foi adotado o ciclo de congelamento nos ensaios.

O grau de susceptibilidade por umidade pode ser determinado a partir da preparação de um conjunto de CPs compactados em laboratório ou extraídos do campo. Nesta pesquisa, os CPs foram moldados com o mesmo volume de vazios esperado no pavimento em serviço, ou seja, o Vv obtido com o teor de projeto determinado na dosagem Marshall e, conseqüentemente, semelhantes aos CPs moldados para os demais ensaios, e divididos em dois sub-conjuntos: um não condicionado e outro

submetido a um determinado condicionamento. O primeiro foi submetido ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, após, pelo menos, passar 4 horas à 25°C, sendo este o resultado do próprio ensaio de RT comentado no item 5.2, e o segundo passou por um procedimento diferenciado quanto ao condicionamento, onde foram submetidos à saturação com água durante o tempo necessário para atingir entre 55% e 80% de seu volume de vazios por meio de uma bomba de vácuo que aplicou uma pressão de 70 kPa (525 mm Hg) (Figura 5.16) seguido de imersão em banho à 60 °C por 24 horas, e, logo após serem imersos por uma hora a 25 °C, foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

A relação entre a RT de CPs submetidos ao condicionamento e a RT de CPs não condicionados é chamada de Razão de Resistência à Tração (RRT). O critério de aceitação das misturas é de $RRT \geq 70\%$. Os resultados dos ensaios que apresentam uma RRT maior ou igual a 80% não são consideradas susceptíveis ao dano por umidade (FURLAN, 2006).

Na Tabela 5.8 e no Anexo F apresentam-se os resultados do ensaio de RT para CPs condicionados, além dos valores médios da RT, o desvio padrão e o coeficiente de variação de cada mistura. Os valores médios de RT de CPs condicionados e não condicionados, enquanto que os valores da RRT estão mostrados na Tabela 5.9. Nas Figuras 5.17 e 5.18 apresentam-se, respectivamente, gráficos com os valores médios de RT obtidos nas misturas, condicionadas e não condicionadas, e os valores da RRT.



(a) Processo de saturação do CP



(b) Detalhe dos CPs durante saturação

Figura 5.16 – Fotos do processo de saturação dos corpos-de-prova no ensaio de dano por umidade induzida.

Tabela 5.8 – Valores da RT obtidos dos ensaios de resistência à tração dos CPs condicionados.

Compactação Marshall								
Mistura	RT (MPa)					Médias RT (MPa)	Desvio Padrão RT (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1	2	3	4	5			
0%	0,910	0,857	0,920	0,940	0,896	0,904	0,031	3,43
2%	0,935	0,626	0,875	0,756	0,861	0,811	0,122	15,01
4%	0,073	0,000	0,480	0,227	0,156	0,187	0,185	98,73

Compactação Superpave								
Mistura	RT (MPa)					Médias RT (MPa)	Desvio Padrão RT (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1	2	3	4	5			
0%	1,178	1,085	1,180	1,252	1,172	1,173	0,059	5,03
2%	1,189	1,125	1,103	1,126	1,196	1,148	0,042	3,66

Tabela 5.9 – Relação de Resistência à Tração (RRT).

Compactação Marshall			
Mistura	RT (MPa)	RT _{COND} (MPa)	RRT (%)
0%	0,968	0,904	93
2%	0,835	0,811	97
4%	0,917	0,187	20

Compactação Superpave			
Mistura	RT (MPa)	RT _{COND} (MPa)	RRT (%)
0%	1,178	1,173	100
2%	1,286	1,148	89

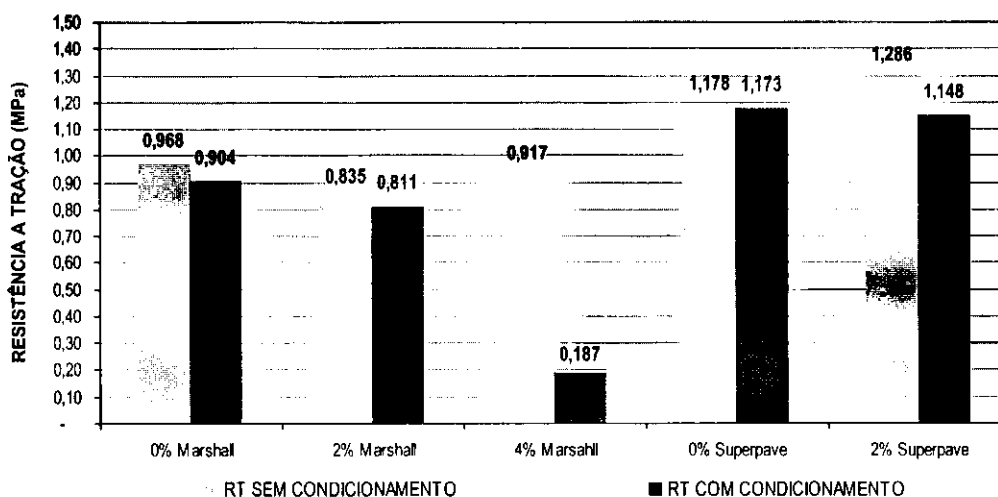


Figura 5.17 – Valores da resistência à tração de CPs condicionados e não condicionados em função do percentual de gesso.

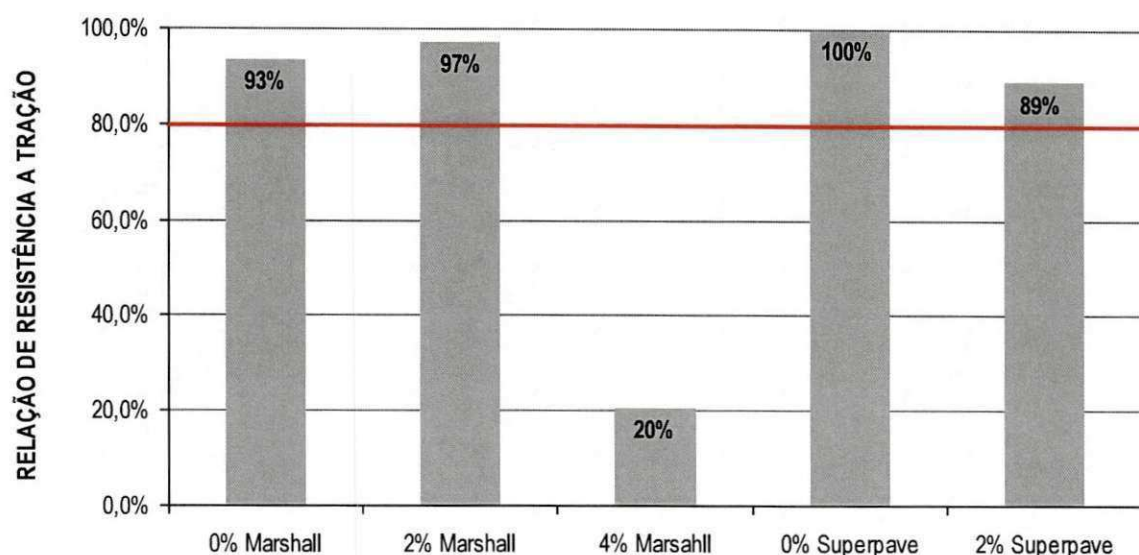


Figura 5.18 – Valores da Relação de Resistência à Tração (RRT) em função do percentual de gesso.

As misturas de referência e 2% tiveram suas RRT maiores que 80% nos dois procedimentos de moldagem, por isso essas misturas não são consideradas susceptíveis ao dano por umidade, considerando o tipo de condicionamento adotado no ensaio. Apenas a mistura 4% se mostrou susceptível ao dano por umidade. Ressalta-se, ainda, a diferença de 77% na RRT entre a mistura 2% e 4%, na moldagem Marshall.

De uma avaliação visual dos CPs, condicionados e não condicionados, após o ensaio, é possível concluir que, nas misturas de referência e 2%, o mástique resistiu o suficiente para que a ruptura se desse, principalmente, na interface com os agregados graúdos, o que sugere que o fator crítico no rompimento foi a adesividade do mástique aos agregados graúdos. Já na mistura 4%, a ruptura ocorreu no mástique, a exemplo dos CPs não condicionados. Ou seja, a quantidade de filer adicionada na mistura 4% passou a enfraquecer o mástique, quando esta foi submetida à ação da água e à temperatura do ensaio. Nas Figuras 5.19 a 5.21, são mostradas imagens dos planos de ruptura de alguns CPs condicionados e não condicionados, com moldagem Marshall, nas quais é possível verificar onde se dá a ruptura dos CP, se no mástique ou na interface do mástique com os agregados graúdos.

Os resultados obtidos demonstram que o ensaio de dano por umidade pode ser usado para avaliação quantitativa, tanto da adesividade entre o mástique e os demais agregados, quanto da resistência do mástique.

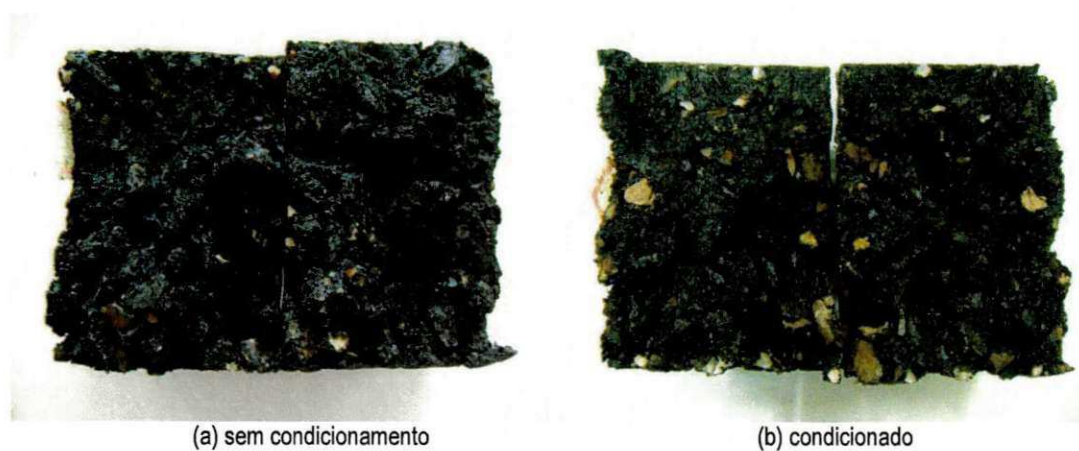


Figura 5.19 – Aspectos do corpo-de-prova com 0% de gesso no ensaio de dano por umidade – moldagem Marshall.

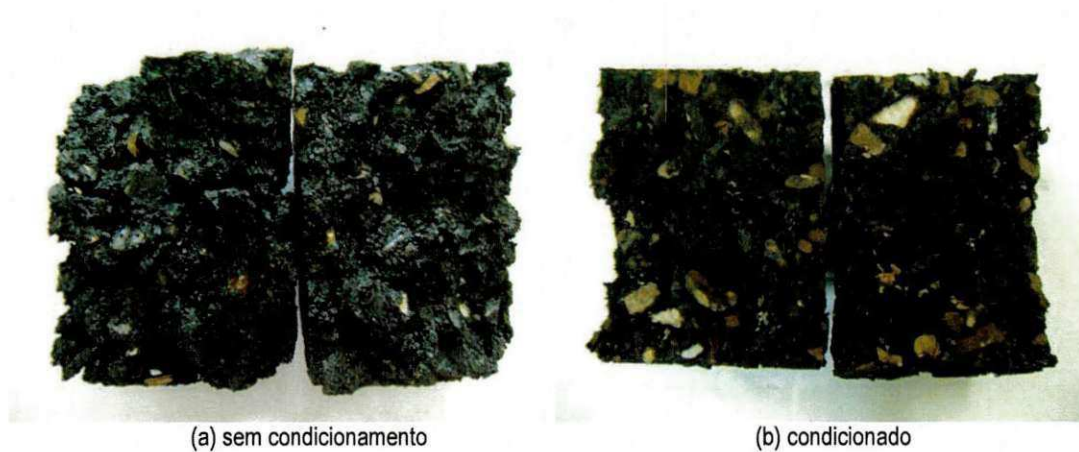


Figura 5.20 – Aspectos do corpo-de-prova com 2% de gesso no ensaio de dano por umidade – moldagem Marshall.



Figura 5.21 – Aspectos do corpo-de-prova com 4% de gesso no ensaio de dano por umidade – moldagem Marshall.

5.8. Deformação permanente por compressão uniaxial sob carga estática

O ensaio adotado nesse estudo para avaliação da deformação permanente é conhecido também como *creep* estático, e consiste na submissão do corpo-de-prova a uma carga de compressão estática axial, durante um período estabelecido, de onde é possível obter as deformações do CP em função do tempo. Neste estudo, o ensaio teve duração de 2 horas sendo que, durante a primeira hora (3600 s) o CP estava sob o efeito do carregamento de 100 kPa e na segunda hora o CP estava descarregado. Dadas as condições disponíveis no GEOPAV, considerando, que existem concentrações de esforços nas faces não perfeitamente paralelas dos CPs, para fins de comparação entre as misturas estudadas, utilizou-se o aparelho de adensamento de solos para aplicação da carga e as deformações foram medidas no topo dos CPs.

Antes da execução dos ensaios, os CPs foram condicionados à temperatura de 25 °C por, no mínimo 4 horas, no SIEMBS, para garantir o equilíbrio térmico das amostras. Durante o ensaio a temperatura ambiente no laboratório, nas proximidades do CP, era constantemente monitorada e controlada através de ajustes nos climatizadores (aparelhos de ar-condicionado). O equipamento que foi usado para a determinação da deformação permanente, a prensa de adensamento de solos, e os acessórios utilizados durante o ensaio podem ser vistos na Figura 5.22.

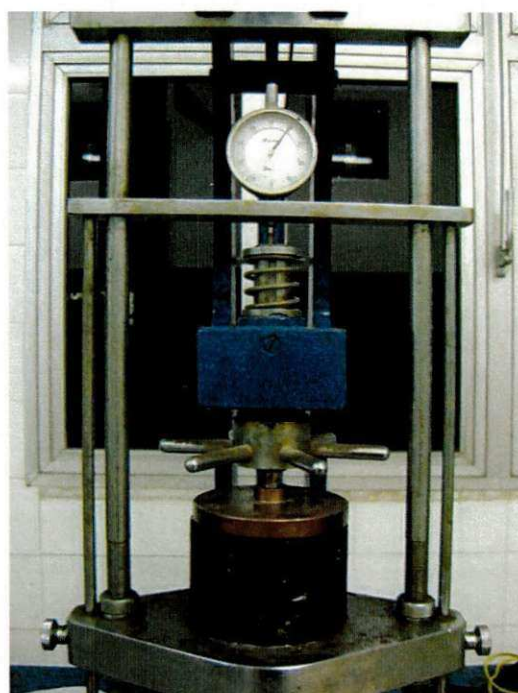
As misturas estudadas foram a de referência e a 2%, nas moldagens Marshall e Superpave. Os resultados foram obtidos pela deformação relativa média de cinco (5) CPs para cada mistura, totalizando vinte (20) CPs. Os valores das deformações relativas dos CPs estão apresentados no Anexo G. A mistura 4% com moldagem Marshall não foi ensaiada devido aos resultados no ensaio de dano por umidade, que torna sua aplicação tecnicamente inviável. As curvas de *creep*, resultantes do experimento, por mistura, estão apresentadas na Figura 5.23.

Os resultados obtidos nesta pesquisa estão de acordo com os encontrados na literatura, onde se registra: as características de forma e granulometria dos agregados, o teor de CAP e a energia e forma de compactação como fatores importantes que interferem na resistência de uma mistura asfáltica à deformação permanente. Dos resultados obtidos nesta pesquisa, também se observou que: as misturas com 2% de gesso tiveram menor deformação que as misturas de referência devido à maior rigidez do mástique com gesso e menor TP; e as misturas moldadas no CGS tiveram menores deformações, que na moldagem com o compactador Marshall, devido à maior energia e forma de compactação na moldagem.

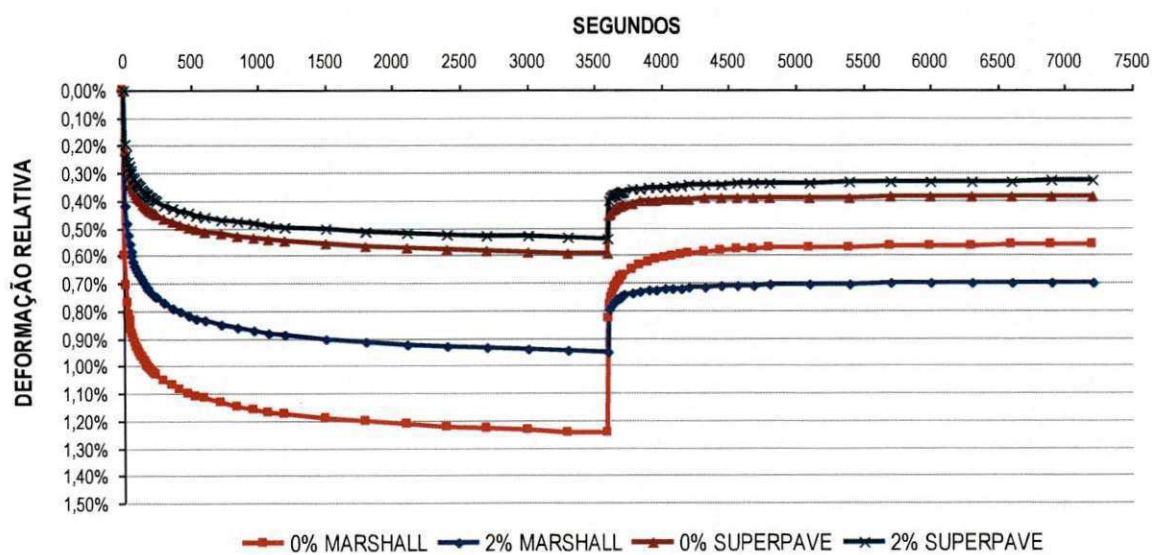
Apesar de se verificar que, na moldagem Marshall, a recuperação elástica da mistura de referência foi maior que a da mistura 2%, as duas tiveram deformações relativas maiores que 0,8% ao final de uma hora de ensaio, atingindo um estado avançado de dano, que Bernucci *et al.* (2006) denominam rompimento, e que, uma vez atingido, classifica a mistura como inadequada para resistir às deformações permanentes. O mesmo não aconteceu com as misturas Superpave, pois não atingiram esse limite de deformação.



(a) Vista geral da prensa de adensamento utilizada no ensaio.



(b) Detalhe do CP durante ensaio.

Figura 5.22 – Fotos de um dos ensaios de *creep* estático em andamento.Figura 5.23 – Curvas de *creep* das misturas.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas desta pesquisa, bem como as sugestões para que pesquisas futuras aconteçam sobre o tema abordado.

6.1. Conclusões

A revisão bibliográfica mostrou que a utilização do resíduo de gesso em misturas asfálticas não havia sido estudada à luz das características mecânicas abordadas por esta pesquisa. Isso dificultou a comparação dos resultados com outros estudos, no entanto, confirma a relativa originalidade do trabalho.

6.1.1. Quanto à caracterização do resíduo de gesso

O resíduo apresentou características semelhantes às da literatura, em termos de composição química, granulometria, massa específica e perda de massa por aquecimento. O material mostrou-se homogêneo e sem a presença significativa de outros materiais característicos do resíduo de construção de demolição.

O resíduo de gesso apresentou quantidade significativa de óxidos de enxofre e de cálcio, característicos da gipsita e do gesso puro.

Após o processo de redução do diâmetro das partículas, a distribuição granulométrica do resíduo de gesso atendeu aos limites aceitáveis para utilização como filer. O resíduo apresentou uma distribuição do tamanho das partículas característica de filer ativo.

O resíduo de gesso não se mostrou solúvel quando imerso no querosene. Isto sugere que o mesmo permanece inerte quando envolvido pelo cimento asfáltico de petróleo na mistura asfáltica.

Não foi necessária a correção da massa de resíduo de gesso na mistura para compensar a perda de massa que ocorre após a calcinação (da ordem de 20%), visto que as determinações necessárias à dosagem e a adição do resíduo à mistura foram feitas após a secagem do resíduo à temperatura de 105 °C, na qual a perda mais significativa já havia acontecido.

6.1.2. Quanto à dosagem Marshall das misturas asfálticas

As misturas com adição do resíduo de gesso apresentaram valores mais baixos para o volume de vazios e vazios do agregado mineral, e maiores para a relação betume/vazios e a densidade aparente da mistura compactada.

A adição do resíduo de gesso permitiu uma redução de consumo de CAP de cerca de 10,8%, nas misturas 2% e 4%, em comparação com a mistura sem resíduo, verificando-se a diminuição do teor de ligante de projeto.

Adotando-se o teor de ligante de projeto, as misturas de referência, 2% e 4% atenderam aos requisitos da norma de concreto asfáltico do DNIT, quanto ao valor de estabilidade mínima. A mistura de referência apresentou maior valor de estabilidade, mas, nas duas misturas com gesso, também foi maior que 500 kgf. A mistura 4% apresentou o maior valor de fluência, enquanto que o menor valor foi o da mistura 2%.

6.1.3. Quanto à caracterização mecânica

Além da influência do gesso como material de enchimento, que por si só aumentou a rigidez das misturas, os resultados estão vinculados à diferença do teor de ligante, que na mistura de referência foi maior do que nas misturas que receberam adição de gesso.

Todas as misturas atenderam aos requisitos da norma de concreto asfáltico do DNIT quanto ao valor de resistência à tração mínima. Considerando a diferença no teor de ligante, a resistência à tração das misturas aumentou com a adição de resíduo gesso, com exceção da diferença entre as misturas Marshall de referência e 2%.

As misturas que incluem gesso em sua composição apresentaram maiores valores de MR. A mistura 2% moldada com compactação Marshall apresentou o maior valor de MR, no entanto, maior coeficiente de variação.

O acréscimo de resíduo de gesso às misturas, nas proporções que foram estudadas, tornou a mistura mais resistente à fadiga. Verificou-se a tendência de que a relação MR/RT é inversamente proporcional à vida de fadiga das misturas analisadas, ou seja, em geral, as misturas com maior valor da relação MR/RT apresentaram menor resistência à fadiga.

As misturas com gesso apresentaram maior desgaste Cântabro, mas atenderam ao limite da norma do DNIT.

Da avaliação do efeito deletério da água, concluiu-se que as misturas de referência e 2% não se mostraram susceptíveis ao dano por umidade, enquanto que a mistura 4% apresentou uma relação de resistência à tração de 20%.

Apesar do atendimento e até da melhoria de outras características mecânicas, não é recomendável a produção da mistura 4% no campo.

Ensaio de dano por umidade induzida podem ser utilizados para avaliar quantitativamente, tanto a adesividade entre o mástique e os demais agregados, quanto da resistência do mástique.

O concreto asfáltico com adição de resíduo apresentou maior resistência à deformação permanente que o concreto sem o resíduo.

6.1.4. Quanto à diferença entre moldagem Marshall e Superpave

Na moldagem para os ensaios mecânicos através da metodologia Marshall, os corpos-de-prova apresentaram maiores volumes de vazios, menores valores de densidades aparentes e relação betume/vazios, quando comparados com a metodologia Superpave.

A resistência à tração foi menor e o módulo de resiliência foi maior, na metodologia Marshall do que na Superpave.

A relação MR/RT das misturas moldadas através do método Superpave apresentou valores inferiores aos obtidos da moldagem Marshall, resultante da maior RT e menor MR das misturas moldadas por amassamento.

Os corpos-de-prova moldados pela metodologia Superpave apresentaram maior resistência à fadiga do que os corpos-de-prova moldados pela metodologia Marshall.

Não houve diferença, nos resultados de desgaste Cântabro, para a mistura de referência submetida às duas formas de moldagem. Na mistura 2%, observou-se maior desgaste na mistura com moldagem Marshall do que na mistura com a moldagem Superpave.

No que se refere ao dano por umidade induzida nas misturas de referência, a relação de resistência à tração da mistura com moldagem Superpave foi maior que com a moldagem Marshall. Por outro lado, na mistura 2%, os valores de RRT da mistura com moldagem Marshall superou os valores de RRT da moldagem Superpave.

As misturas moldadas pela metodologia Superpave apresentaram maior resistência à deformação permanente do que as misturas moldadas pela metodologia Marshall.

Na análise dos ensaios, os resultados obtidos com amostras moldadas por amassamento, apresentaram menor desvio padrão e menor coeficiente de variação, indicando que essa metodologia permite, também, uma melhor reprodução de corpos-de-prova representativos das características das misturas.

Esses resultados são indicadores da necessidade de se promover melhorias, ou mesmo, alterações nas normas de dosagem e moldagem em vigor no país para que se encontre uma melhor reprodução, em laboratório, das condições de campo.

6.1.5. Considerações finais

O resíduo de gesso conferiu, às misturas asfálticas analisadas, alterações positivas nas propriedades mecânicas abordadas, o que indica ser viável a adição desse tipo de resíduo como material de enchimento em misturas betuminosas do tipo CAUQ.

Para uma avaliação de escala de produção, o consumo de resíduo de gesso em uma tonelada de massa asfáltica da mistura 2% é de 18,9 kg. A produção de uma usina do porte da utilizada pela EMURB, em Aracaju, que produz até 150 t/dia de CAUQ, poderia utilizar 2,84 toneladas de resíduo de gesso por dia. Um serviço de pavimentação de uma via com revestimento asfáltico de 7,5 m de largura e 7 cm de altura, utilizaria aproximadamente 23 toneladas de resíduo de gesso por quilômetro.

Com a realização desta pesquisa, em face das determinações que a legislação ambiental brasileira impõe aos gestores públicos quanto à destinação dos resíduos de gesso, percebe-se que a inserção do resíduo de gesso em misturas asfálticas é uma alternativa promissora para a destinação adequada deste rejeito.

Com base nesta pesquisa em escala de laboratório, conclui-se, finalmente, que o aproveitamento do resíduo de gesso se mostra como uma alternativa vantajosa para a indústria da construção civil, que é a fonte geradora, agregando valor a um produto que atualmente é descartado, por vezes, de forma inadequada. Da mesma forma, é também vantajosa para a administração pública que passa a aplicar um produto de grande potencial poluidor em uma destinação nobre, de baixo custo e tecnicamente competitiva.

Entende-se que mais pesquisas são necessárias para reforçar as conclusões ora formuladas, no entanto, pode-se indicar que, de acordo com os resultados obtidos e ora apresentados, a utilização de resíduos de gesso como filler em misturas asfálticas se mostra como uma alternativa tecnicamente viável.

6.2. Sugestões de pesquisas futuras

Para ampliar a base de dados sobre aplicação do resíduo de gesso na pavimentação, sugere-se:

- Ampliar o estudo de caracterização das misturas com a utilização de resíduos de gesso a partir de outros métodos de dosagem, como o SUPERPAVE, e o incremento no número de amostras ensaiadas, contemplando ensaios de caracterização ambiental.
- Analisar misturas asfálticas dosadas a frio, visto que são muito utilizadas em vias urbanas, com a utilização do resíduo de gesso.
- Estudar o gesso com outros agregados, em outras granulometrias, e com outros tipos de CAP em misturas do tipo CAUQ e SMA, aumentando o banco de dados da pesquisa;
- Adicionar o gesso previamente ao ligante, modificando-o, semelhante ao processo via úmida, empregado para resíduos de pneus moídos, contemplando a análise química do ligante modificado com gesso;
- Avaliar a diferença entre a moldagem Marshall e a Superpave utilizando o mesmo volume de vazios, variando apenas a forma de compactação, ou seja, impacto e amassamento;
- Analisar o dano por umidade induzida a partir de outras normas. Aproveitar os ensaios de avaliação do efeito da umidade em misturas com gesso para determinar o módulo de resiliência em CPs condicionados e não condicionados para verificar as variações dessa característica mecânica;
- Utilizar as imagens do ensaio de vida de fadiga para estudar a progressão de trincas em misturas asfálticas, e ampliar a base de dados de ensaios de deformação permanente, utilizando outras temperaturas de ensaio e comparando o método utilizado na pesquisa com outros;
- O estudo de procedimentos e adequações das usinas de CAUQ para beneficiamento do resíduo de gesso e inserção desse material nos processos de produção;
- A construção e monitoramento de trechos experimentais em revestimento asfáltico com a inclusão de resíduo de gesso como filer, a fim de observar aspectos como compactação, envelhecimento e reações ao tráfego.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. *AASHTO T 209 – Standard Method of Test for Maximum Specific Gravity of Bituminous Paving Mixtures*. Washington, 1994.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12891: Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall*. Rio de Janeiro, 1993.
- _____. *NBR 15115 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação*. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. *NBR 15116 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos*. Rio de Janeiro, 2004.
- ALDIGUERI, D. R.; PARENTE, E. B.; SOARES, J. B. *Estudo da aplicabilidade de solo contaminado com petróleo como material para revestimento de vias de baixo volume de tráfego*. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 18., 2004, Florianópolis. *Anais...Florianópolis: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*, 2004.
- AL-QUADI, I. L.; SAYED, T.; ALNUAIME, N. A.; MASAD, E. *Efficient transportation and pavement systems: Characterization, mechanisms, simulation and modeling*. London: Taylor & Francis Group, 2009.
- ANP – AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. *Resolução ANP nº 19, de 11 jul. 2005. Estabelece as especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP)*. Brasília: Diário Oficial da União, publicada em 12 jul. 2005, republicada em 13 jul. 2005, retificada em 25 jul. 2005 e 17 mar. 2006.
- _____. *Resolução ANP nº 39, de 24.12.2008*. Brasília: Diário Oficial da União, 2008.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D 2041 – Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. Philadelphia, 2000a.
- _____. *ASTM D 242 – Specifications for mineral filler for bituminous paving mixtures*. Philadelphia, 1985.

- _____. *ASTM D 2726 – Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures*. Philadelphia, 2000b.
- _____. *ASTM D 4867 – Standard test method for effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures*. Philadelphia, 1996.
- BALBO, J. T. *Pavimentação Asfáltica – materiais, projeto e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BARRA, B. S.; MOMM, L.; BERNUCCI, L. L. B. *Influência do pó calcário calcítico do estado do Pará na dosagem dos mástiques e na viscosidade dos cimentos asfálticos de petróleo*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 36., 2005, Curitiba. *Anais...* Curitiba: ABPv, 2005.
- BARRA, B. S.; MOMM, L. *Avaliação das características químicas e físicas dos fileres pó calcário e pó de brita na formulação dos mástiques asfálticos*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 39., 2008, Recife. *Anais...* Recife: ABPv, 2008.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. *Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: PETROBRAS & ABEDA, 2006.
- BNB – BANCO DO NORDESTE. *Investir no Nordeste – Fatores de atratividade – Gesso – Maior Reserva mundial de gipsita* Disponível em: <http://www.bnb.gov.br/content/aplicação/investir_no_nordeste/fatores_de_atratividade/gerados/gesso.asp>. Acesso em: 05 fev. 2010.
- BONET, I. I. *Valorização do resíduo areia de fundição (RAF). Incorporação nas massas asfálticas do tipo C. B. U. Q.*. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Habitação. *Déficit Habitacional no Brasil 2007*. Brasília: Fundação João Pinheiro & Centro de Estatística e Informações, 2009a.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil*. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 20 fev. 2009b.

- BRASIL. Ministério do Planejamento Orçamento e Gestão. IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. *Estrutura e dinâmica do setor de serviços no Brasil*. Organização dos textos por João Alberto de Negri e Luiz Cláudio Kubota. Brasília: IPEA, 2006.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. *Rede rodoviária do plano nacional de aviação: divisão em trechos 2009*. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/plano-nacional-de-viacao/pnv-2009-para-impressao.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2010.
- CABRAL, G. L. L.; VIEIRA, A. *Agregado artificial de argila calcinada: A metodologia de produção, a primeira produção experimental e a proteção da inovação tecnológica pelo IME*. Revista Pavimentação, Rio de Janeiro, n. 3, p. 28-40, 2006.
- CAMPOS, A. M. L. S.; *O efeito da temperatura de queima no agregado sintético de argila calcinada, aplicado em concreto asfáltico*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2008.
- CASTELO BRANCO, V. T. F. *Caracterização de misturas asfálticas com uso de escória de aciaria como agregado*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.
- CAVALCANTE, E. H.; GONÇALVES JÚNIOR, L. A.; CARDOSO, G. *Estudos para aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha de Sergipe na pavimentação rodoviária*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 37., 2006, Goiânia. *Anais...* Goiânia: ABPv, 2006.
- CAVALCANTE, V. T. F.; SOARES, J. B. *O efeito do tipo e do teor de filer nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 33., Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: ABPv, 2001.
- COELHO, W.; SÓRIA, M. H. A. *Variabilidade dos resultados do método Marshall*. In: Encontro de Asfalto, 11., Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: IBP, 1992.
- COSTA, C.; PINTO, S.; VENTORINI, L. A. *Uso de rejeito industrial em misturas do tipo concreto asfáltico*. Revista Pavimentação, Rio de Janeiro, n. 9, p. 6-16, 2008.
- COUTINHO NETO, B., FABBRI, G. T. P. *Ensaio de fluência uniaxial estático – avaliação do efeito devido à redução do diâmetro do prato de aplicação de carga*. In: Congresso de pesquisa e ensino em transportes, 18., Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2004.

- CUNHA, M. B. *Avaliação do método Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.
- DALTRO FILHO, J.; BANDEIRA, A. A.; BARRETO, I. M. C. B. N.; AGRA, L. G. S. *Avaliação da composição e quantidade dos resíduos sólidos da construção civil de Aracaju – Sergipe – Brasil*. In: Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 8., 2006, Fortaleza. *Anais...Fortaleza*: ABES, 2006.
- DER SE – DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRA-ESTRUTURA RODOVIÁRIA. *Usina de asfalto do DER amplia produção para manter qualidade das rodovias*. Disponível em: <www.der.se.gov.br/modules/news/article.php?storyid=209>. Acesso em: 28 nov. 2008.
- DIAS, E. R.; SANTANNA-GRECO, J. A. *Investigação sobre a aplicação de resíduos sólidos reciclados da construção civil em revestimentos de pavimentos econômicos*. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 16., 2009, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: ABPv, 2009.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *DNER-EM 367/97: Material de enchimento para misturas betuminosas*. Rio de Janeiro, 1997a.
- _____. *DNER-ES 386/99: Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito*. Rio de Janeiro, 1999a.
- _____. *DNER-ME 035/98: Agregados – determinação da abrasão "Los Angeles"*. Rio de Janeiro, 1998a.
- _____. *DNER-ME 043/95: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall*. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. *DNER-ME 054/97: Equivalente de areia*. Rio de Janeiro, 1997b.
- _____. *DNER-ME 078/94: Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso*. Rio de Janeiro, 1994a.
- _____. *DNER-ME 081/98: Agregados – determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo*. Rio de Janeiro, 1998b.
- _____. *DNER-ME 083/98: Agregados – análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 1998c.

_____. *DNER-ME 085/94: Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real.* Rio de Janeiro, 1994b.

_____. *DNER-ME 117/94: Misturas betuminosas – determinação da densidade aparente.* Rio de Janeiro, 1994c.

_____. *DNER-ME 133/94: Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência.* Rio de Janeiro, 1994d.

_____. *DNER-ME 138/94: Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral.* Rio de Janeiro, 1994e.

_____. *DNER-ME 194/98: Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.* Rio de Janeiro, 1998d.

_____. *DNER-ME 195/97: Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo.* Rio de Janeiro, 1997c.

_____. *DNER-ME 213/94: Solos – determinação do teor de umidade.* Rio de Janeiro, 1994f.

_____. *DNER-ME 383/99: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro.* Rio de Janeiro, 1999b.

_____. *DNER-PRO 120/97: Coleta de amostras de agregados.* Rio de Janeiro, 1997d.

_____. *DNER-PRO 199/96: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório.* Rio de Janeiro, 1996.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. *DNIT-ES 031/2006: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de Serviço.* Rio de Janeiro, 2006a.

_____. *DNIT-ES DNIT 033/2005: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina – Especificação de Serviço.* Rio de Janeiro, 2005a.

_____. *DNIT-ES DNIT 034/2005: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local – Especificação de Serviço.* Rio de Janeiro, 2005b.

_____. *DNIT-TER 005/2003 – TER: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia*. Rio de Janeiro, 2003.

_____. *Manual de Pavimentação*. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006b.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. *Balanço mineral brasileiro 2001*. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=361>. Acesso em: 20 fev. 2009.

DRYWALL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE CHAPAS PARA DRYWALL. *Resíduos de gesso na construção civil: Coleta, armazenagem e destinação para a reciclagem*. DRYWALL: São Paulo, 2009

FALCÃO, P. R. F.; OLIVEIRA, C. G. M.; FARIAS, M. M.; SÁ E BENEVIDES, S. A. *Influência da variação da composição granulométrica nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas C.B.U.Q.* In: Reunião de Pavimentação Urbana, 12., 2003, Aracaju. *Anais...* Aracaju: ABPv, 2003.

FERNANDES, M. W. Q.; RODRIGUES, J. K. G.; LUCENA, L. C. F. L.; LUCENA, A. E. F. L. *Utilização dos filleres do resíduo do caulim e do granito em misturas asfálticas*. *Revista Pavimentação*, Rio de Janeiro, n. 11, p. 43-50, 2008.

FROTA, C. A.; MELO, D. M.; NUNES, F. R. G. *Estudo de creep de misturas asfálticas com resíduo processado da construção civil*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 36., Curitiba. *Anais...* Curitiba: ABPv, 2005.

FROTA, C. A.; MENTA, C. O.; NUNES, F. R. G. *Utilização de entulho reciclado em misturas asfálticas para a região de Manaus-AM*. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 12., 2003, Aracaju. *Anais...* Aracaju: ABPv, 2003a.

FROTA, C. A.; NUNES, F. R. G.; ALENCAR, C. L. S. *Estudo da cal de carbureto como filer em misturas asfálticas*. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 12., 2003, Aracaju. *Anais...* Aracaju: ABPv, 2003b.

FROTA, C. A.; NUNES, F. R. G.; SILVA, C. L. *Estudo da substituição de seixo por agregados sintéticos de argila calcinada em misturas asfálticas*. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 12., 2003, Aracaju. *Anais...* Aracaju: ABPv, 2003c.

- FURLAN, A. P. *Considerações acerca da adesão e da susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.
- GOMES, L.; RIBEIRO, J. Q.; AZEVEDO, M. C. *Desempenho de misturas betuminosas com reciclagem a quente*. Revista Pavimentação, Rio de Janeiro, n. 4, p. 25-40, 2006.
- HUANG, Y. H. *Pavement Analysis and Design*. 2 ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2004.
- JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. *Alternativas de Gestão dos Resíduos de Gesso. Contribuição apresentada à discussão da reformulação da Resolução CONAMA 307, relativa à gestão do gesso. Julho de 2003*. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/Alternativas%20para%20gestão%20de%20resíduos%20de%20gesso%20v2.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2010.
- JOHN, V. M. *Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. Tese de Livre Docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- LEAL, C. L. D.; CASTRO, P. F.; MANSUR, R. U. *Aproveitamento do polietileno tereftalato em concreto asfáltico*. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 13., 2006, Maceió. *Anais...* Maceió: ABPv, 2006.
- LINS, E. A. M.; MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T.; BRITO, A. R.; ALVES, I. R. F. S. *Avaliação da Insalubridade causada pelo biogás de um aterro de resíduos sólidos urbanos*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23., 2005, Campo Grande. *Anais...* Campo Grande: ABES, 2005.
- LOUREIRO, T. G. *Estudo da evolução do dano por fadiga em misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2003.
- LUCENA, A. E. F. L. *Utilização de cascalhos de perfuração oriundos das atividades de exploração de petróleo em revestimentos asfálticos de estradas*. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2008.
- LUCENA, L. C. F. L.; RODRIGUES, J. K. G.; MORAIS, C. R. S.; LUCENA, A. E. F. L.; LUCENA, L. F. L.; *Utilização de resíduo vítreo como filer em misturas asfálticas*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 39., 2008, Recife. *Anais...* Recife: ABPv, 2008.

- LUCENA, L. C. F. L. *Verificação da influência do uso de resíduos industriais como filer em misturas asfálticas sob efeito da presença d'água*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2009.
- LYRA SOBRINHO, A. C. P. DE; AMARAL, A. J. R. DO; DANTAS, J. O. C.; DANTAS, J. R. A. *Balanço mineral brasileiro – Gipsita*. Brasília, 2001. Disponível em: <www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/gipsita.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2009.
- MACÊDO, R. M.; CAVALCANTE, F. P.; MACÊDO, J. A. G.; MOTTA, L. M. G.; COSTA, L. M. *Aproveitamento de resíduos da construção e demolição para fins de pavimentação no estado da Paraíba*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 39., 2008, Recife. *Anais...* Recife: ABPv, 2008.
- 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 em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.
- MARQUES, J. A.; da PAZ, E. C. *Processos para reciclagem de pneus inservíveis*. Revista Pavimentação, Rio de Janeiro, n. 6, p. 16-23, 2007.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. *Mecânica dos pavimentos*. 2. ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005.
- MELO, D. M. *Estudo do resíduo de construção e demolição oriundo do município de Manaus-AM em misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2010.
- MENDONÇA, R. L.; RODRIGUES, G. L. C.; ALVES, J. N. *Utilização de escória de aciaria como revestimento primário*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 39., 2008. Recife. *Anais...* Recife: ABPv, 2008.
- MOIZINHO, J. C.; CARVALHO, J. C.; FARIAS, M. M. *Agregado laterítico do estado de Roraima e seu uso em CBUQ*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 36., 2005. Curitiba. *Anais...* Curitiba: ABPv, 2005.
- MOTTA, L. M. G.; FERNANDES, C. *Utilização de resíduo sólido da construção civil em pavimentação urbana*. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 12., 2003. Aracaju. *Anais...* Aracaju: ABPv, 2003.

- MOTA, L. M. G. *Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1991.
- MUGAYAR, A. N.; BALBO, J. T.; SACHET, T.; PINTO, P. C.; ALBUQUERQUE, M. C. F. *Avaliação do efeito da adição de borracha moída de pneus no concreto compactado com rolo*. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 16., 2009, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: ABPv, 2009.
- NÓBREGA, R. D.; MELO, R. A. *Uso de agregados de resíduos da construção civil na pavimentação urbana em João Pessoa*. In: Encontro Nacional Sobre Aproveitamento de Resíduos da Construção, Feira de Santana. *Anais...* Feira de Santana: ANTAC, 2009.
- ONOFRE, F. C.; LOPES, M. M.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. *Aplicação de solos contaminados por petróleo em misturas asfálticas*. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 16., 2009, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: ABPv, 2009.
- PAIVA, O. A.; LIMA, S. P. B.; CAMPELO N. S.; CAMPOS, A. M. L. S.; SILVA, J.F.A.; TAVEIRA, A.F.S.; REBELO, E. P. *Emprego de resíduo cerâmico do pólo oleiro de Iranduba/AM, em substituição ao filler de misturas asfálticas à quente – CBUQ*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 38., 2007, Manaus. *Anais...* Manaus: ABPv, 2007.
- PATRIOTA, M. B. *Análise laboratorial de concreto betuminoso usinado a quente modificado com adição de borracha reciclada de pneus – processo seco*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2004.
- PETRUCCI, E. G. R. *Materiais de construção*. 11. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1998.
- PINHEIRO, J. H. M. *Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (Processos úmido e seco)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2004.
- PINTO, S. *Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1991.
- PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. *Pavimentação Rodoviária - Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis*. Rio de Janeiro: Editora COPIARTE, 2002.

- PINTO, T. P. *Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana*. Tese de Doutorado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.
- PMA – PREFEITURA MUNICIPAL DE ARACAJU. EMURB – EMPRESA MUNICIPAL DE OBRAS E URBANIZAÇÃO. *Nova usina de asfalto vai duplicar a capacidade produtiva do município*. Disponível em: <www.aracaju.se.gov.br/index.php?act=leitura&codigo=36916#>. Acesso em: 30 jan. 2009.
- RIBEIRO, A. S. *Produção de gesso reciclado a partir de resíduos oriundos da construção civil*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2006.
- SÁ, M. F. P. *Estudo da deformação permanente de misturas betuminosas através de ensaios estáticos e dinâmicos*. Resumo da Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1996.
- SACHET, T.; BALBO, J. T.; PINTO, P.; MUGAYAR, A. N.; C.; ALBUQUERQUE, M. C. F. *Avaliação do efeito da adição de borracha moída de pneus no concreto compactado com rolo*. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 16., 2009, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: ABPv, 2009.
- SANTANA, H. *Considerações sobre os Nebulosos Conceitos e Definições de Filler em Misturas Asfálticas*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 29., 1995. *Anais...* Cuiabá: ABPv, 1995, vol. 1; p. 574-604.
- SILVA, J. B.; DUTRA, R. P. S.; NASCIMENTO, R. M.; MARTINELLI, A. E.; GOMES, U. U. *Avaliação da incorporação de rejeitos de gesso de construção em formulações de massa cerâmica*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, 17., 2006, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu: 2006a.
- SILVA, M. A. V.; PINTO, S.; VENTORINI, L. F.; VIEIRA, A. *Misturas asfálticas a quente com agregado de argila calcinada*. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 13., 2006, Maceió. *Anais...* Maceió: ABPv, 2006b.
- SILVA, P. F. A. *Manual de patologia e manutenção de pavimentos*. São Paulo: Pini, 2005.
- SINDUGESSO – Sindicato da Indústria do Gesso do Estado de Pernambuco. *Pólo gesso: Força para o gesso de Pernambuco*. Disponível em: <<http://www.sindusgesso.org.br>>. Acesso em: 20 jun. 2009.

- SINDUSCON-SP. *Gestão ambiental de resíduos da construção civil: A experiência do Sinduscon-SP*. Tarcísio de Paulo Pinto, coordenador. São Paulo: Sinduscon-SP, 2005.
- SOARES, J. B.; FREITAS, F. A. C.; CASTELO BRANCO, J. V.; MOTTA, L. M. G. *Método de Previsão do Teor Ótimo de Ligante em Misturas Asfálticas tipo CBUQ*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 32., Brasília. *Anais...* Brasília, ABPv, 2000, v. I, p. 148-160.
- SOUZA, J. B. Q. *Comportamento de misturas asfálticas a quente com agregados provenientes de jazidas de seixo no estado do Pará*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2007.
- SPECHT, L. P. *Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.
- SPECHT, L. P.; BORGES, P. A. P.; CERATTI, J. A. P. *Análise reológica de ligantes modificados com borracha reciclada de pneus*. Revista Pavimentação, Rio de Janeiro, n. 7, p. 37-44, 2007a.
- SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P.; BRITO L. A. T. *Avaliação das propriedades plásticas de misturas asfálticas com incorporação de borracha de pneus através dos processos úmido e seco*. Revista Pavimentação, Rio de Janeiro, n. 8, p. 34-43, 2007b.
- TAVARES, D. A. C.; MELO, R. O. L., in, MELO E SOUZA, R.; SOARES, M. J. N. (Orgs). *Sustentabilidade, cidadania & estratégias ambientais: a experiência sergipana*. São Cristóvão: Editora UFS, 2008.
- VALE, A. C. *Estudo laboratorial da viabilidade do uso de fibras de coco em misturas asfálticas do tipo SMA*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2007.
- VALE, A. C.; SOARES, J. B.; CASAGRANDE, M. D. T. *Misturas asfálticas do tipo SMA com fibra de coco*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 38., Manaus. *Anais...* Manaus: ABPv, 2007.
- VASCONCELOS, A. J. *Restauração da avenida Tancredo Neves*. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 12., 2003, Aracaju. *Anais...* Aracaju: ABPv, 2003.

- VASCONCELOS, K. L. *Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2004.
- VASCONCELOS, K. L.; EVANGELISTA JÚNIOR, F.; SOARES, J. B. *Análise da estrutura interna de misturas asfálticas*. Disponível em : <www.det.ufc.br/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=199&Itemid=143 ->. Acesso em: 14 jun. 2009.
- VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B. *Efeito da densidade máxima teórica e da densidade aparente do corpo-de-prova compactado na dosagem de misturas asfálticas*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 36., Curitiba. *Anais...* Curitiba: ABPv, 2005.
- VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B. *Efeito do procedimento de dosagem no teor de projeto e comportamento mecânico de misturas asfálticas*. Disponível em : <<http://ceasf.petrobras.com.br/portalPublicacao.do?method=view&codigo=1091>>. Acesso em: 14 jun. 2009.
- WESSELING, D. H. *Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais*. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.
- WESSELING, D. H.; SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. *Estudo laboratorial do comportamento de misturas em concreto asfáltico com diferentes tipos de filers*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 34., Campinas. *Anais...* Campinas: ABPv, 2003.

ANEXOS

ANEXO A – RELATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO DO CAP

CERTIFICADO DE ENSAIO
 Produto: CIMENTO ASFALTICO 50/70 Código: 71K

 Local de Amostragem: TQ 2222207A
 Data/ hora Amostragem: 05/06/09 22:30
 Data/ hora Recebimento: 05/06/09 23:00

 Laboratório: DP - PLAM
 Endereço: Rod. BA 522 - Km 4
 Gão. P. do Cond. SA - CEP 43970-003
 Telefone: (071) 36042655 Fax: (071) 36041455

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
PENETRAÇÃO	D 5	50 a 70	54	0,1 mm
PONTO DE AMOLECIMENTO	D 35	45 min	48,4	grau C
VISCOSIDADE BROOKFIELD 135 GC-3P21 20RPM	D 4402	274 min	397,71	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD 150 GC-3P21	D 4402	112 min	198,18	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 177 GC-3P21	D 4402	57 a 295	73,40	cp
RTFOT PENETRAÇÃO RETIDA	D 5	55 min	78	%
RTFOT-AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO	D 35	8 max	8	grau C
RTFOT - DUCTILIDADE A 25 GC	D 113	20 min	> 160	cm
RTFOT VARIACAO EM % MASSA	D 2872	0,5 max	0,16	%
DUCTILIDADE A 25 GC	D 113	50 min	> 160	cm
SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO	D 2043	55,5 min	100,0	% massa
PONTO DE FULGOR	D 92	225 min	312	grau C
ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE TÉRMICA	X 015	-1,5 a 0,7	-1,2	N/A
DENSIDADE RELATIVA A 20/4 GC	D 70	Arquit	1,039	N/A
AQUECIMENTO A 177 GC	X 015	NESP	NESP	N/A

Notas:

- (1) Ensaio não faz parte da especificação, informação para fins de fabricamento.
 (2) NESP = Não espuma

Data de Emissão: 07/06/2009 15:05:53 Página: 1 de 1

Os resultados deste Certificado de Ensaio referem-se à amostra acima especificada.
 Este certificado só pode ser reproduzido integralmente com a autorização do responsável pelo seu conteúdo.

Original Assinado Por:

 Responsável:
 Mariuce Cantuário Lacarda
 CRQ: 7400859

ANEXO B – RELATÓRIO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO RESÍDUO DE GESSO



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes



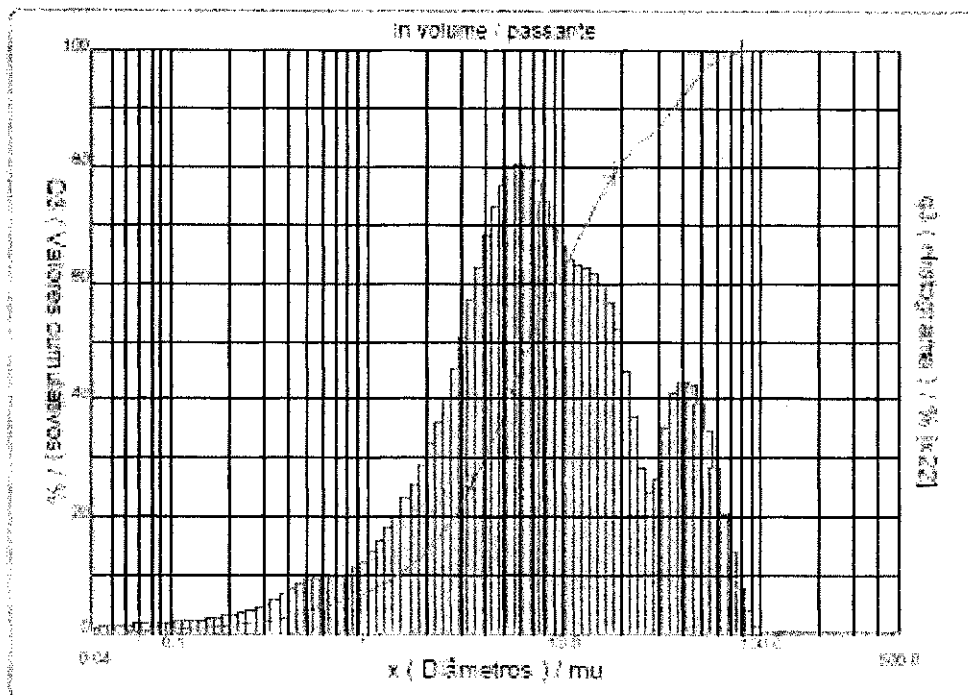
Ref da amostra	: Gesso_ClaudioBallista	Ultrassom	: 60	%
Type produit	: Argila	Concentração	: 62	
Client	: UFPA	Diámetro a 10%	: 1.45	mu
Comentarios	: Calibrado	Diámetro a 50%	: 6.69	mu
Líquido	: Água	Diámetro a 90%	: 36.18	mu
Agente dispersante	: HMFNa	Diámetro médio	: 12.77	mu
Operador	: Juliana	Fraunhofer		
Empresa	: UFPA	Densidade/Fator		
Localização	: Campina Grande - PE	Superfície específica		
Data	: 2/10/2009 Hora: 15:20:43	Diluição automática	: Não / Não	
Índice med.	: 1412	Medida./Ump.	: 60/60/3	
		SOP	: Argila	

Valores cumulativos particulares						In volume / passante				
x	0.04	0.07	0.10	0.25	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	4.00
Q3	0.09	0.37	0.62	1.67	3.70	5.50	7.01	14.02	21.96	30.15
x	5.00	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00	65.00	80.00	100.00	150.00
Q3	36.00	62.21	81.02	86.57	92.02	96.13	99.11	99.97	100.00	100.00

x: diámetro / mu Q3: valor cumulativo / % q3: Histograma / %

Porcentagem do usuário

%	25.00	40.00	75.00	85.00	100.00
Q3	3.38	5.37	15.65	26.41	50.00



**ANEXO C – PLANILHA DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO
DIAMETRAL**



PPGECA

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil e Ambiental

GEOPAV

Laboratório de Geotecnia e Pavimentação
Universidade Federal de Sergipe

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Projeto: Dissertação de mestrado - Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente

Interessado: Rodrigo Dias Freitas
DNER - ME - 138/94 - Misturas betuminosas - determinação da resistência à tração por compressão diametral

Método: diametral

Material: Corpos-de-prova moldados em laboratório
Agregados da Emurb - Aracaju; CAP 50/70 da RLAM; Resíduos de gesso de obras residenciais de Aracaju

Origem: Aracaju

Data do ensaio: 2009

Operador: Rodrigo Dias Freitas

Mistura	CP	D méd (cm)	H méd (cm)	Leitura Prensa (div)	Força (Kgf)	QR (Kgf/cm ²)	QR (MPa)	QR Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
Marshall - 0%	RT 1/0	10,15	6,44	543	1038,22	10,115	0,992	0,968	0,049
	RT 2/0	10,16	6,32	556	1063,07	10,531	1,033		
	RT 3/0	10,16	6,50	504	963,65	9,282	0,910		
	RT 4/0	10,12	6,42	531	1015,27	9,940	0,975		
	RT 5/0	10,15	6,47	513	980,86	9,504	0,932		
Marshall - 2%	RT 1/2	10,13	6,49	478	913,94	8,848	0,868	0,835	0,053
	RT 2/2	10,16	6,53	465	889,08	8,536	0,837		
	RT 3/2	10,14	6,57	426	814,51	7,787	0,764		
	RT 4/2	10,15	6,49	446	852,75	8,240	0,808		
	RT 5/2	10,14	6,53	499	954,09	9,175	0,900		
Marshall - 4%	RT 1/4	10,14	6,47	480	917,76	8,904	0,873	0,917	0,060
	RT 2/4	10,16	6,39	511	977,03	9,589	0,940		
	RT 3/4	10,16	6,43	511	977,03	9,513	0,933		
	RT 4/4	10,14	6,40	541	1034,39	10,147	0,995		
	RT 5/4	10,14	6,47	463	885,26	8,583	0,842		
Superpave - 0%	SRT 1/0	10,00	6,48	621	1187,35	11,675	1,145	1,178	0,032
	SRT 2/0	9,99	6,45	624	1193,09	11,784	1,156		
	SRT 3/0	10,00	6,47	663	1267,66	12,467	1,223		
	SRT 4/0	9,99	6,53	639	1221,77	11,923	1,169		
	SRT 5/0	9,99	6,46	649	1240,89	12,235	1,200		
Superpave - 2%	SRT 1/2	9,99	6,46	670	1281,04	12,633	1,239	1,286	0,033
	SRT 2/2	10,03	6,44	709	1355,61	13,361	1,310		
	SRT 3/2	9,99	6,46	687	1313,54	12,960	1,271		
	SRT 4/2	10,00	6,49	700	1338,40	13,135	1,288		
	SRT 5/2	9,99	6,45	714	1365,17	13,483	1,322		

ANEXO D – PLANILHAS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA



PPGECA

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil e Ambiental

GEOPAV

Laboratório de Geotecnia e Pavimentação
Universidade Federal de Sergipe

MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Projeto: Dissertação de mestrado - Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente

Interessado: Rodrigo Dias Freitas

Método: DNER - ME - 133/94 - Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência

Material: Corpos-de-prova moldados no Compactador Marshall GEOPAV/UFS - Mistura de referência Agregados da Emurb - Aracaju; CAP 50/70 da RLAM; Resíduos de gesso de obras residenciais de Aracaju

Origem: de Aracaju

Data do ensaio: 2009

Operador: Rodrigo Dias Freitas

Corpo-de-Prova	H (cm)	D (cm)	Aplicações	MR (Mpa)	MR(90°) (Mpa)
MR 1/0	6,35	10,12	300	2751,22	2741,99
	6,42	10,11	400	3159,75	2579,00
	6,35	10,09	500	3207,89	2527,49
				3039,62	2616,16
	6,37	10,11	MÉDIA		2827,89
MR 2/0	6,46	10,13	300	2297,24	2235,43
	6,49	10,14	400	2159,60	2343,36
	6,54	10,13	500	2227,32	2357,75
				2228,05	2312,18
	6,50	10,13	MÉDIA		2270,12
MR 3/0	6,48	10,10	300	2198,80	2196,03
	6,43	10,09	400	2163,60	2183,97
	6,43	10,09	500	2171,86	1980,61
				2178,09	2120,20
	6,45	10,09	MÉDIA		2149,15
MR 4/0	6,28	10,14	300	1962,67	2365,57
	6,31	10,14	400	1941,08	2437,82
	6,30	10,16	500	1951,94	2387,42
				1951,90	2396,94
	6,30	10,15	MÉDIA		2174,42
MR 5/0	6,36	10,15	300	3013,18	2462,72
	6,37	10,16	400	2974,51	2262,66
	6,41	10,16	500	2985,38	2396,26
				2991,02	2373,88
	6,38	10,16	MÉDIA		2682,45
MÉDIA DA MISTURA					2420,80



PPGECA

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil e Ambiental

GEOPAV

Laboratório de Geotecnia e Pavimentação
Universidade Federal de Sergipe

MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Projeto: Dissertação de mestrado - Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente

Interessado: Rodrigo Dias Freitas

Método: DNER - ME - 133/94 - Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência

Material: Corpos-de-prova moldados no Compactador Marshall GEOPAV/UFS - Mistura 2% Agregados da Emurb - Aracaju; CAP 50/70 da RLAM; Resíduos de gesso de obras residenciais de Aracaju

Origem: de Aracaju

Data do ensaio: 2009

Operador: Rodrigo Dias Freitas

Corpo-de-Prova	H (cm)	D (cm)	Aplicações	MR (Mpa)	MR(90°) (Mpa)
MR 1/2	6,57	10,17	300	4422,75	4084,15
	6,55	10,18	400	4052,09	4422,75
	6,54	10,17	500	4520,20	4052,09
				4331,68	4186,33
		6,55	10,17	MÉDIA	
MR 2/2	6,30	10,11	300	3383,62	4296,29
	6,30	10,12	400	3371,05	4035,90
	6,30	10,16	500	3426,38	3993,93
				3393,68	4108,71
		6,30	10,13	MÉDIA	
MR 3/2	6,55	10,15	300	3626,20	3458,15
	6,58	10,12	400	3739,15	3676,96
	6,56	10,13	500	3803,36	3633,87
				3722,90	3589,66
		6,56	10,13	MÉDIA	
MR 4/2	6,51	10,12	300	3134,95	2363,32
	6,47	10,14	400	3226,22	2291,13
	6,47	10,14	500	3248,99	2363,12
				3203,39	2339,19
		6,48	10,13	MÉDIA	
MR 5/2	6,52	10,15	300	3526,64	3565,24
	6,50	10,15	400	3419,69	3918,86
	6,53	10,15	500	3486,97	3641,85
				3477,77	3708,65
		6,52	10,15	MÉDIA	
MÉDIA DA MISTURA					3606,20



PPGECA

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil e Ambiental

GEOPAV

Laboratório de Geotecnia e Pavimentação
Universidade Federal de Sergipe

MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Projeto: Dissertação de mestrado - Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente

Interessado: Rodrigo Dias Freitas

Método: DNER - ME - 133/94 - Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência

Material: Corpos-de-prova moldados no Compactador Marshall GEOPAV/UFS - Mistura 4% Agregados da Emurb - Aracaju; CAP 50/70 da RLAM; Resíduos de gesso de obras residenciais de Aracaju

Origem: de Aracaju

Data do ensaio: 2009

Operador: Rodrigo Dias Freitas

Corpo-de-Prova	H (cm)	D (cm)	Aplicações	MR (Mpa)	MR(90°) (Mpa)
MR 1/4	6,27	10,16	300	3895,89	4407,34
	6,28	10,17	400	3891,36	4381,77
	6,27	10,16	500	4097,49	4370,04
				3961,58	4386,38
	6,27	10,16	MÉDIA		4173,98
MR 2/4	6,42	10,16	300	4021,84	3124,73
	6,46	10,18	400	4088,82	3348,16
	6,42	10,16	500	4361,73	3225,69
				4157,46	3232,86
	6,43	10,17	MÉDIA		3695,16
MR 3/4	6,46	10,14	300	2907,90	3832,22
	6,47	10,13	400	2806,30	3836,71
	6,48	10,14	500	3171,11	
				2961,77	3834,47
	6,47	10,14	MÉDIA		3398,12
MR 4/4	6,37	10,15	300	3912,66	2286,30
	6,38	10,15	400	3698,01	2289,35
	6,39	10,15	500	3639,48	2200,43
				3750,05	2258,69
	6,38	10,15	MÉDIA		3004,37
MR 5/4	6,40	10,18	300	3015,57	3489,47
	6,41	10,16	400	3102,43	3315,57
	6,42	10,15	500	3150,19	3522,43
				3089,40	3442,49
	6,41	10,16	MÉDIA		3265,94
MÉDIA DA MISTURA					3507,52



PPGECA

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil e Ambiental

GEOPAV

Laboratório de Geotecnia e Pavimentação
Universidade Federal de Sergipe

MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Projeto: Dissertação de mestrado - Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente

Interessado: Rodrigo Dias Freitas

Método: DNER - ME - 133/94 - Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência

Material: Corpos-de-prova moldados no CGS/LMP/UFC - Mistura de referência Agregados da Emurb - Aracaju; CAP 50/70 da RLAM; Resíduos de gesso de obras residenciais de Aracaju

Origem: de Aracaju

Data do ensaio: 2009

Operador: Rodrigo Dias Freitas

Corpo-de-Prova	H (cm)	D (cm)	Aplicações	MR (Mpa)	MR(90°) (Mpa)
SMR 1/0	6,49	10,00	300	2208,85	2447,86
	6,49	10,00	400	2155,42	2440,80
	6,49	9,98	500	2203,14	2374,10
				2189,14	2420,92
	6,49	9,99	MÉDIA		2305,03
SMR 2/0	6,50	9,97	300	2263,51	2379,03
	6,50	9,99	400	2200,82	2187,39
	6,51	9,98	500	2203,12	2511,98
				2222,48	2359,47
	6,50	9,98	MÉDIA		2290,98
SMR 3/0	6,47	10,00	300	2258,07	2391,72
	6,46	9,99	400	2238,91	2322,34
	6,46	9,99	500	2179,15	2318,23
				2225,38	2344,10
	6,46	9,99	MÉDIA		2284,74
SMR 4/0	6,50	10,00	300	2147,60	2735,56
	6,51	10,00	400	2174,17	2603,86
	6,51	9,99	500	2274,74	2771,86
				2198,84	2703,76
	6,51	10,00	MÉDIA		2451,30
SMR 5/0	6,45	9,99	300	2706,78	2585,35
	6,45	9,99	400	2590,37	2601,08
	6,45	10,00	500	2643,99	2569,28
				2647,05	2585,24
	6,45	9,99	MÉDIA		2616,14
MÉDIA DA MISTURA					2389,64



PPGECA

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil e Ambiental

GEOPAV

Laboratório de Geotecnia e Pavimentação
Universidade Federal de Sergipe

MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Projeto: Dissertação de mestrado - Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente

Interessado: Rodrigo Dias Freitas

Método: DNER - ME - 133/94 - Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência

Material: Corpos-de-prova moldados no CGS/LMP/UFC - Mistura 2%
Agregados da Emurb - Aracaju; CAP 50/70 da RLAM; Resíduos de gesso de obras residenciais de Aracaju

Origem: de Aracaju

Data do ensaio: 2009

Operador: Rodrigo Dias Freitas

Corpo-de-Prova	H (cm)	D (cm)	Aplicações	MR (Mpa)	MR(90°) (Mpa)
SMR 1/2	6,42	10,00	300	2644,44	2398,36
	6,43	10,00	400	2537,66	2365,94
	6,42	9,98	500	2666,51	2321,02
				2616,20	2361,77
	6,42	9,99	MÉDIA		2488,99
SMR 2/2	6,50	9,98	300	2522,87	2874,19
	6,50	10,00	400	2491,38	2896,10
	6,51	10,00	500	2567,44	2846,19
				2527,23	2872,16
	6,50	9,99	MÉDIA		2699,70
SMR 3/2	6,52	9,99	300	2096,02	3028,57
	6,53	10,00	400	2201,63	2943,57
	6,52	9,99	500	2487,13	2946,81
				2261,59	2972,98
	6,52	9,99	MÉDIA		2617,29
SMR 4/2	6,51	10,00	300	2558,52	2186,95
	6,52	10,00	400	2660,87	2429,59
	6,52	9,98	500	2510,63	2584,01
				2576,67	2400,18
	6,52	9,99	MÉDIA		2488,43
SMR 5/2	6,46	10,00	300	2497,42	2295,28
	6,47	10,00	400	2615,66	2371,96
	6,48	10,00	500	2525,25	2419,51
				2546,11	2362,25
	6,47	10,00	MÉDIA		2454,18
MÉDIA DA MISTURA					2549,72

**ANEXO E – PLANILHA DOS ENSAIOS DE VIDA DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL À
TENSÃO CONTROLADA**



PPGECA

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil e Ambiental

GEOPAV

Laboratório de Geotecnia e Pavimentação
Universidade Federal de Sergipe

ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL À TENSÃO CONTROLADA

Dissertação de mestrado - Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente

Projeto:

Interessado:

Método:

Material:

Origem:

Data do ensaio:

Operador:

Rodrigo Dias Freitas

Agregados da Emurb - Aracaju; CAP 50/70 da RLAM; Resíduos de gesso de obras residenciais de Aracaju

Corpos-de-prova moldados em laboratório - Marshall

2009

Rodrigo Dias Freitas

Misturas	Corpo-de-prova	D méd (cm)	H méd (cm)	σ_R médio (MPa)	Porcentagem de σ_R médio	σ (MPa)	Força calculada (Kgf)	Diferença de Tensões (MPa)	Número de Golpes
Marshall - 0%	FG 1/0	10,13	6,42	0,968	10%	0,097	98,985	0,387	3.427
	FG 2/0	10,13	6,30	0,968	10%	0,097	97,282	0,387	7.025
	FG 3/0	10,15	6,42	0,968	20%	0,194	198,062	0,774	1.929
	FG 4/0	10,14	6,37	0,968	20%	0,194	196,530	0,774	1.766
	FG 5/0	10,14	6,39	0,968	30%	0,290	295,429	1,162	1.098
	FG 6/0	10,12	6,43	0,968	30%	0,290	297,710	1,162	1.117
	FG 7/0	10,16	6,38	0,968	50%	0,484	492,810	1,936	552
	FG 8/0	10,13	6,40	0,968	50%	0,484	492,895	1,936	637
Marshall - 2%	FG 1/2	10,14	6,47	0,835	10%	0,084	86,179	0,334	5.590
	FG 2/2	10,17	6,43	0,835	10%	0,084	85,815	0,334	8.109
	FG 3/2	10,14	6,46	0,835	20%	0,167	171,494	0,668	4.022
	FG 4/2	10,13	6,52	0,835	20%	0,167	173,689	0,668	3.274
	FG 5/2	10,14	6,46	0,835	30%	0,251	257,871	1,002	2.205
	FG 6/2	10,16	6,42	0,835	30%	0,251	257,031	1,002	1.875
	FG 7/2	10,14	6,55	0,835	50%	0,418	435,346	1,670	1.045
	FG 8/2	10,14	6,60	0,835	50%	0,418	437,806	1,670	919
Marshall - 4%	FG 1/4	10,16	6,46	0,917	10%	0,092	94,491	0,367	37.842
	FG 2/4	10,17	6,43	0,917	10%	0,092	94,150	0,367	29.350
	FG 3/4	10,13	6,36	0,917	20%	0,183	185,701	0,734	10.572
	FG 4/4	10,15	6,33	0,917	20%	0,183	184,910	0,734	7.909
	FG 5/4	10,15	6,35	0,917	30%	0,275	278,370	1,100	3.585
	FG 6/4	10,13	6,48	0,917	30%	0,275	283,232	1,100	3.630
	FG 7/4	10,14	6,37	0,917	50%	0,459	465,655	1,834	2.737
	FG 8/4	10,15	6,40	0,917	50%	0,459	468,066	1,834	2.242



PPGECA

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil e Ambiental

GEOPAV

Laboratório de Geotecnia e Pavimentação
Universidade Federal de Sergipe

ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL À TENSÃO CONTROLADA

Dissertação de mestrado - Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente

Projeto:

Rodrigo Dias Freitas

Interessado:

Rodrigo Dias Freitas

Método:

Agregados da Emurb - Aracaju; CAP 50/70 da RLAM; Resíduos de gesso de obras residenciais de

Material:

Aracaju

Origem:

Corpos-de-prova moldados em laboratório - Superpave

Data do ensaio:

2009

Operador:

Rodrigo Dias Freitas

Misturas	Corpo-de-prova	D méd (cm)	H méd (cm)	$\sigma_{R \text{ médio}}$ (MPa)	Porcentagem de $\sigma_{R \text{ médio}}$	σ (MPa)	Força calculada (Kgf)	Diferença de Tensões (MPa)	Número de Golpes
Superpave - 0%	SFG 1/0	9,99	6,48	1,178	10%	0,118	119,848	0,471	77.007
	SFG 2/0	9,99	6,53	1,178	10%	0,118	120,710	0,471	54.376
	SFG 3/0	10,00	6,51	1,178	20%	0,236	241,045	0,942	11.641
	SFG 4/0	9,99	6,50	1,178	20%	0,236	240,434	0,942	17.110
	SFG 5/0	9,99	6,49	1,178	30%	0,353	359,552	1,414	4.933
	SFG 6/0	9,99	6,51	1,178	30%	0,353	361,198	1,414	4.543
	SFG 7/0	9,98	6,51	1,178	50%	0,589	600,498	2,356	3.126
	SFG 8/0	9,99	6,41	1,178	50%	0,589	592,151	2,356	2.769
Superpave - 0%	SFG 1/2	9,99	6,47	1,286	10%	0,129	130,566	0,514	142.248
	SFG 2/2	9,99	6,51	1,286	10%	0,129	131,438	0,514	184.941
	SFG 3/2	9,99	6,52	1,286	20%	0,257	263,285	1,029	53.069
	SFG 4/2	9,99	6,45	1,286	20%	0,257	259,930	1,029	22.138
	SFG 5/2	9,99	6,42	1,286	30%	0,386	388,484	1,543	12.047
	SFG 6/2	9,99	6,52	1,286	30%	0,386	394,524	1,543	13.977
	SFG 7/2	9,99	6,50	1,286	40%	0,514	525,481	2,058	5.658
	SFG 8/2	9,99	6,52	1,286	40%	0,514	525,505	2,058	8.366

**ANEXO F – PLANILHA DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO
DIAMETRAL DAS AMOSTRAS CONDICIONADAS NA AVALIAÇÃO DO DANO POR UMIDADE
INDUZIDA**



PPGECA

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil e Ambiental

GEOPAV

Laboratório de Geotecnia e Pavimentação
Universidade Federal de Sergipe

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL – CORPOS-DE-PROVA CONDICIONADOS

Projeto: Dissertação de mestrado - Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente

Interessado: Rodrigo Dias Freitas
DNER - ME - 138/94 - Misturas betuminosas - determinação da resistência à tração por compressão diametral; ASTM D 4867 – Standard test method for effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures

Método: misturas

Material: Corpos-de-prova moldados em laboratório condicionados
Agregados da Emurb - Aracaju; CAP 50/70 da RLAM; Resíduos de gesso de obras residenciais de Aracaju

Origem: Aracaju

Data do ensaio: 2009

Operador: Rodrigo Dias Freitas

Mistura	CP	D méd (cm)	H méd (cm)	Leitura Prensa (div)	Força (Kgf)	OR (Kgf/cm ²)	OR (MPa)	OR Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
Marshall - 0%	DU 1/0	10,14	6,35	491	938,79	9,279	0,910	0,904	0,031
	DU 2/0	10,15	6,47	471	900,55	8,737	0,857		
	DU 3/0	10,14	6,33	495	946,44	9,382	0,920		
	DU 4/0	10,17	6,32	506	967,47	9,583	0,940		
	DU 5/0	10,17	6,35	485	927,32	9,134	0,896		
Marshall - 2%	DU 1/2	10,17	6,24	497	950,26	9,530	0,935	0,811	0,122
	DU 2/2	10,14	6,49	345	659,64	6,380	0,626		
	DU 3/2	10,15	6,28	467	892,90	8,925	0,875		
	DU 4/2	10,16	6,41	413	789,66	7,713	0,756		
	DU 5/2	10,13	6,40	468	894,82	8,782	0,861		
Marshall - 4%	DU 1/4	10,13	6,31	39	74,57	0,743	0,073	0,187	0,185
	DU 2/4	10,14	6,30	0	0,00	0,000	0,000		
	DU 3/4	10,15	6,25	255	487,56	4,897	0,480		
	DU 4/4	10,16	6,38	123	235,18	2,310	0,227		
	DU 5/4	10,12	6,28	83	158,70	1,590	0,156		
Superpave - 0%	SDU 1/0	10,00	6,48	639	1221,77	12,013	1,178	1,173	0,059
	SDU 2/0	9,99	6,45	586	1120,43	11,066	1,085		
	SDU 3/0	10,00	6,47	640	1223,68	12,034	1,180		
	SDU 4/0	9,99	6,53	684	1307,81	12,763	1,252		
	SDU 5/0	9,99	6,46	634	1212,21	11,952	1,172		
Superpave - 2%	SDU 1/2	9,99	6,46	643	1229,42	12,124	1,189	1,148	0,042
	SDU 2/2	10,03	6,44	609	1164,41	11,476	1,125		
	SDU 3/2	9,99	6,46	596	1139,55	11,243	1,103		
	SDU 4/2	10,00	6,49	612	1170,14	11,484	1,126		
	SDU 5/2	9,99	6,45	646	1235,15	12,199	1,196		

**ANEXO G – PLANILHAS E GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE POR
COMPRESSÃO AXIAL ESTÁTICA**



PPGECA

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil e Ambiental

GEOPAV

Laboratório de Geotecnia e Pavimentação
Universidade Federal de Sergipe

CREEP ESTÁTICO

Projeto: Dissertação de mestrado - Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente

Interessado: Rodrigo Dias Freitas

Método: GEOPAV

Material: Corpos-de-prova moldados no Compactador Marshall GEOPAV/UFS - Mistura de referência Agregados da Emurb - Aracaju; CAP 50/70 da RLAM; Resíduos de gesso de obras residenciais de Aracaju

Origem:

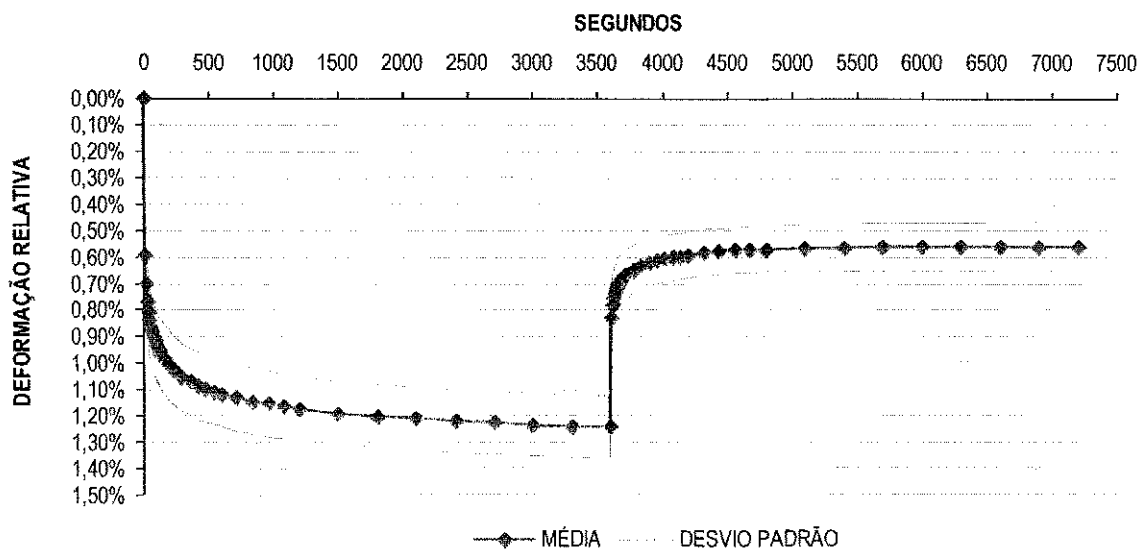
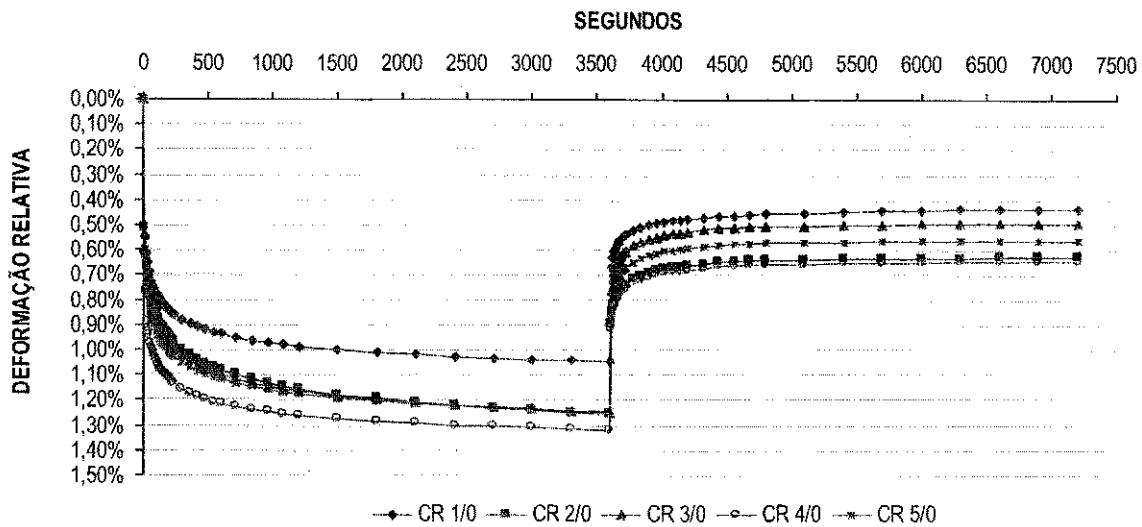
Data do ensaio: Janeiro de 2010

Operador: Rodrigo Dias Freitas

DEFOMAÇÃO RELATIVA (%)

SEGUNDOS	CR 1/0	CR 2/0	CR 3/0	CR 4/0	CR 5/0	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
0	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	
10	0,545%	0,512%	0,542%	0,613%	0,780%	0,598%	0,108%	18%
20	0,615%	0,620%	0,635%	0,767%	0,874%	0,702%	0,115%	16%
30	0,654%	0,667%	0,701%	0,890%	0,936%	0,769%	0,133%	17%
40	0,685%	0,713%	0,746%	0,931%	0,975%	0,810%	0,133%	16%
50	0,704%	0,744%	0,777%	0,943%	1,006%	0,835%	0,132%	16%
60	0,724%	0,775%	0,805%	0,979%	1,030%	0,862%	0,134%	16%
70	0,744%	0,798%	0,828%	0,997%	1,048%	0,883%	0,132%	15%
80	0,755%	0,814%	0,847%	1,012%	1,064%	0,898%	0,133%	15%
90	0,768%	0,837%	0,865%	1,028%	1,078%	0,915%	0,132%	14%
100	0,778%	0,853%	0,881%	1,043%	1,092%	0,929%	0,133%	14%
110	0,786%	0,860%	0,895%	1,055%	1,103%	0,940%	0,134%	14%
120	0,794%	0,876%	0,904%	1,063%	1,111%	0,950%	0,133%	14%
130	0,802%	0,884%	0,916%	1,071%	1,122%	0,959%	0,133%	14%
140	0,810%	0,899%	0,926%	1,080%	1,128%	0,968%	0,132%	14%
150	0,817%	0,907%	0,932%	1,087%	1,137%	0,976%	0,133%	14%
160	0,822%	0,915%	0,944%	1,092%	1,144%	0,983%	0,132%	13%
170	0,828%	0,922%	0,952%	1,101%	1,150%	0,991%	0,132%	13%
180	0,834%	0,930%	0,960%	1,104%	1,154%	0,997%	0,131%	13%
190	0,841%	0,938%	0,966%	1,110%	1,161%	1,003%	0,131%	13%
200	0,844%	0,946%	0,972%	1,117%	1,167%	1,009%	0,131%	13%
210	0,850%	0,953%	0,977%	1,121%	1,170%	1,014%	0,130%	13%
220	0,855%	0,961%	0,983%	1,124%	1,175%	1,020%	0,129%	13%
230	0,856%	0,966%	0,991%	1,132%	1,181%	1,025%	0,131%	13%
240	0,859%	0,971%	0,995%	1,135%	1,184%	1,029%	0,131%	13%
300	0,883%	1,000%	1,022%	1,155%	1,203%	1,052%	0,128%	12%
360	0,897%	1,022%	1,040%	1,172%	1,218%	1,070%	0,128%	12%
420	0,908%	1,039%	1,062%	1,184%	1,232%	1,085%	0,128%	12%
480	0,920%	1,056%	1,077%	1,196%	1,243%	1,099%	0,127%	12%
540	0,933%	1,070%	1,087%	1,207%	1,250%	1,109%	0,125%	11%
600	0,937%	1,082%	1,099%	1,213%	1,259%	1,118%	0,126%	11%
720	0,951%	1,101%	1,118%	1,227%	1,273%	1,134%	0,125%	11%
840	0,964%	1,118%	1,132%	1,239%	1,281%	1,147%	0,124%	11%
960	0,970%	1,132%	1,146%	1,245%	1,292%	1,157%	0,124%	11%
1080	0,979%	1,146%	1,158%	1,255%	1,296%	1,167%	0,123%	11%
1200	0,987%	1,158%	1,164%	1,259%	1,303%	1,174%	0,122%	10%
1500	1,001%	1,178%	1,184%	1,273%	1,318%	1,191%	0,122%	10%

1800	1,012%	1,194%	1,197%	1,287%	1,326%	1,203%	0,121%	10%
2100	1,018%	1,209%	1,209%	1,293%	1,334%	1,213%	0,121%	10%
2400	1,028%	1,223%	1,220%	1,302%	1,342%	1,223%	0,121%	10%
2700	1,032%	1,233%	1,228%	1,305%	1,346%	1,229%	0,121%	10%
3000	1,040%	1,240%	1,235%	1,310%	1,353%	1,236%	0,120%	10%
3300	1,043%	1,250%	1,241%	1,316%	1,357%	1,241%	0,121%	10%
3600	1,048%	1,256%	1,249%	1,319%	1,359%	1,246%	0,120%	10%
3610	0,669%	0,896%	0,762%	0,913%	0,905%	0,829%	0,109%	13%
3620	0,626%	0,848%	0,714%	0,865%	0,853%	0,781%	0,107%	14%
3630	0,606%	0,820%	0,687%	0,837%	0,819%	0,754%	0,103%	14%
3640	0,592%	0,802%	0,669%	0,819%	0,796%	0,735%	0,100%	14%
3650	0,579%	0,788%	0,655%	0,805%	0,780%	0,721%	0,099%	14%
3660	0,573%	0,777%	0,644%	0,794%	0,764%	0,711%	0,097%	14%
3670	0,564%	0,769%	0,635%	0,785%	0,757%	0,702%	0,098%	14%
3680	0,559%	0,763%	0,628%	0,779%	0,749%	0,696%	0,097%	14%
3690	0,553%	0,753%	0,619%	0,770%	0,738%	0,687%	0,096%	14%
3700	0,546%	0,747%	0,613%	0,764%	0,732%	0,680%	0,096%	14%
3710	0,543%	0,743%	0,608%	0,759%	0,724%	0,675%	0,095%	14%
3720	0,540%	0,738%	0,604%	0,755%	0,718%	0,671%	0,094%	14%
3780	0,523%	0,718%	0,584%	0,735%	0,694%	0,651%	0,093%	14%
3840	0,512%	0,702%	0,568%	0,719%	0,674%	0,635%	0,090%	14%
3900	0,501%	0,690%	0,557%	0,707%	0,663%	0,624%	0,090%	14%
3960	0,495%	0,682%	0,550%	0,699%	0,654%	0,616%	0,089%	14%
4020	0,486%	0,673%	0,540%	0,690%	0,644%	0,607%	0,089%	15%
4080	0,483%	0,670%	0,536%	0,687%	0,640%	0,603%	0,089%	15%
4140	0,481%	0,667%	0,533%	0,684%	0,635%	0,600%	0,089%	15%
4200	0,476%	0,660%	0,526%	0,678%	0,629%	0,594%	0,088%	15%
4320	0,469%	0,654%	0,520%	0,672%	0,622%	0,587%	0,089%	15%
4440	0,467%	0,648%	0,514%	0,666%	0,613%	0,582%	0,087%	15%
4560	0,464%	0,643%	0,509%	0,661%	0,607%	0,577%	0,086%	15%
4680	0,459%	0,642%	0,508%	0,660%	0,607%	0,575%	0,087%	15%
4800	0,455%	0,639%	0,505%	0,656%	0,607%	0,572%	0,088%	15%
5100	0,451%	0,637%	0,503%	0,655%	0,607%	0,571%	0,089%	16%
5400	0,448%	0,636%	0,502%	0,653%	0,607%	0,569%	0,090%	16%
5700	0,441%	0,633%	0,498%	0,649%	0,607%	0,565%	0,091%	16%
6000	0,439%	0,631%	0,497%	0,649%	0,607%	0,565%	0,092%	16%
6300	0,437%	0,631%	0,497%	0,647%	0,607%	0,564%	0,092%	16%
6600	0,436%	0,629%	0,495%	0,647%	0,607%	0,563%	0,092%	16%
6900	0,436%	0,629%	0,495%	0,647%	0,607%	0,563%	0,092%	16%
7200	0,436%	0,629%	0,495%	0,647%	0,607%	0,563%	0,092%	16%





PPGECA

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil e Ambiental

GEOPAV

Laboratório de Geotecnia e Pavimentação
Universidade Federal de Sergipe

CREEP ESTÁTICO

Projeto: Dissertação de mestrado - Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente

Interessado: Rodrigo Dias Freitas

Método: GEOPAV

Material: Corpos-de-prova moldados no Compactador Marshall GEOPAV/UFS - Mistura 2% de gesso

Origem: Agregados da Emurb - Aracaju; CAP 50/70 da RLAM; Resíduos de gesso de obras residenciais de Aracaju

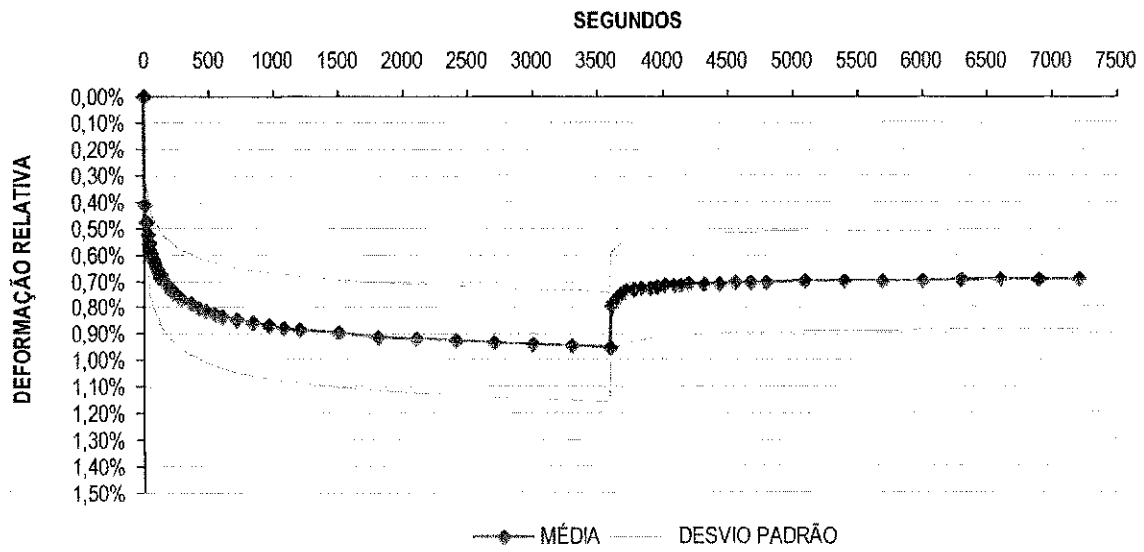
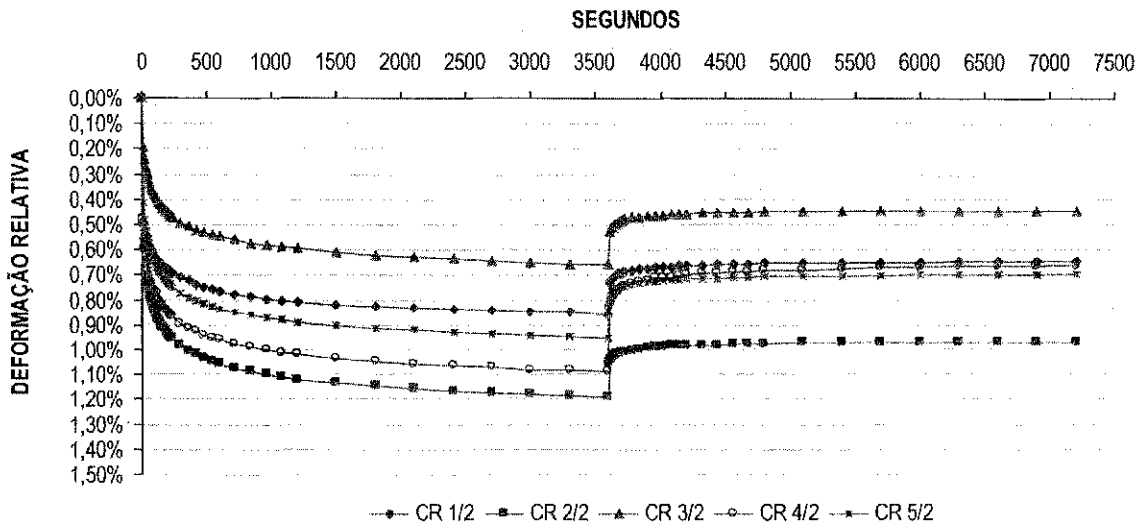
Data do ensaio: Janeiro de 2010

Operador: Rodrigo Dias Freitas

DEFOMAÇÃO RELATIVA (%)

SEGUNDOS	CR 1/2	CR 2/2	CR 3/2	CR 4/2	CR 5/2	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
0	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	
10	0,502%	0,500%	0,194%	0,478%	0,400%	0,415%	0,130%	31%
20	0,525%	0,601%	0,239%	0,563%	0,480%	0,482%	0,143%	30%
30	0,549%	0,656%	0,271%	0,617%	0,528%	0,524%	0,150%	29%
40	0,565%	0,703%	0,299%	0,651%	0,560%	0,555%	0,155%	28%
50	0,580%	0,734%	0,321%	0,679%	0,584%	0,580%	0,159%	27%
60	0,588%	0,761%	0,338%	0,702%	0,608%	0,599%	0,162%	27%
70	0,601%	0,786%	0,353%	0,724%	0,624%	0,617%	0,165%	27%
80	0,612%	0,807%	0,364%	0,741%	0,640%	0,633%	0,169%	27%
90	0,619%	0,825%	0,378%	0,753%	0,652%	0,646%	0,170%	26%
100	0,627%	0,840%	0,388%	0,767%	0,664%	0,657%	0,173%	26%
110	0,635%	0,853%	0,397%	0,776%	0,673%	0,667%	0,174%	26%
120	0,643%	0,865%	0,406%	0,773%	0,683%	0,674%	0,173%	26%
130	0,648%	0,876%	0,416%	0,799%	0,691%	0,686%	0,176%	26%
140	0,654%	0,885%	0,420%	0,804%	0,700%	0,693%	0,177%	26%
150	0,659%	0,895%	0,426%	0,815%	0,705%	0,700%	0,179%	26%
160	0,662%	0,906%	0,434%	0,821%	0,715%	0,707%	0,180%	25%
170	0,666%	0,914%	0,437%	0,830%	0,720%	0,713%	0,182%	25%
180	0,673%	0,921%	0,447%	0,835%	0,724%	0,720%	0,181%	25%
190	0,676%	0,926%	0,450%	0,843%	0,732%	0,725%	0,182%	25%
200	0,677%	0,934%	0,453%	0,849%	0,736%	0,730%	0,184%	25%
210	0,682%	0,940%	0,460%	0,852%	0,742%	0,735%	0,183%	25%
220	0,687%	0,946%	0,464%	0,861%	0,747%	0,741%	0,185%	25%
230	0,690%	0,951%	0,467%	0,864%	0,752%	0,745%	0,185%	25%
240	0,692%	0,956%	0,470%	0,867%	0,755%	0,748%	0,186%	25%
300	0,707%	0,984%	0,493%	0,894%	0,777%	0,771%	0,188%	24%
360	0,721%	1,004%	0,507%	0,912%	0,796%	0,788%	0,191%	24%
420	0,735%	1,020%	0,521%	0,926%	0,811%	0,803%	0,191%	24%
480	0,751%	1,034%	0,530%	0,941%	0,820%	0,815%	0,193%	24%
540	0,756%	1,046%	0,541%	0,954%	0,832%	0,826%	0,194%	24%
600	0,770%	1,057%	0,547%	0,961%	0,840%	0,835%	0,195%	23%
720	0,781%	1,076%	0,560%	0,978%	0,854%	0,850%	0,198%	23%
840	0,787%	1,090%	0,574%	0,991%	0,864%	0,861%	0,198%	23%
960	0,795%	1,101%	0,580%	1,002%	0,878%	0,871%	0,200%	23%
1080	0,800%	1,110%	0,588%	1,011%	0,884%	0,879%	0,201%	23%
1200	0,809%	1,120%	0,595%	1,019%	0,894%	0,887%	0,202%	23%
1500	0,817%	1,134%	0,608%	1,034%	0,910%	0,900%	0,203%	23%

1800	0,825%	1,148%	0,620%	1,048%	0,921%	0,912%	0,204%	22%
2100	0,831%	1,159%	0,629%	1,059%	0,929%	0,921%	0,205%	22%
2400	0,836%	1,168%	0,636%	1,065%	0,937%	0,928%	0,206%	22%
2700	0,845%	1,174%	0,643%	1,073%	0,943%	0,936%	0,206%	22%
3000	0,847%	1,182%	0,650%	1,079%	0,948%	0,941%	0,207%	22%
3300	0,848%	1,188%	0,654%	1,083%	0,955%	0,946%	0,208%	22%
3600	0,863%	1,193%	0,659%	1,090%	0,959%	0,953%	0,207%	22%
3610	0,730%	1,054%	0,527%	0,833%	0,844%	0,798%	0,192%	24%
3620	0,719%	1,043%	0,512%	0,818%	0,832%	0,785%	0,193%	25%
3630	0,713%	1,034%	0,510%	0,802%	0,827%	0,777%	0,190%	24%
3640	0,707%	1,029%	0,502%	0,790%	0,820%	0,770%	0,191%	25%
3650	0,702%	1,024%	0,498%	0,779%	0,817%	0,764%	0,191%	25%
3660	0,699%	1,020%	0,496%	0,773%	0,814%	0,760%	0,190%	25%
3670	0,697%	1,018%	0,493%	0,767%	0,812%	0,757%	0,190%	25%
3680	0,693%	1,015%	0,490%	0,759%	0,809%	0,753%	0,190%	25%
3690	0,692%	1,015%	0,488%	0,756%	0,808%	0,752%	0,191%	25%
3700	0,690%	1,012%	0,485%	0,755%	0,804%	0,749%	0,191%	25%
3710	0,688%	1,010%	0,482%	0,752%	0,803%	0,747%	0,191%	26%
3720	0,685%	1,009%	0,478%	0,747%	0,801%	0,744%	0,192%	26%
3780	0,680%	1,004%	0,471%	0,735%	0,798%	0,738%	0,193%	26%
3840	0,676%	0,998%	0,468%	0,725%	0,795%	0,732%	0,192%	26%
3900	0,672%	0,995%	0,467%	0,719%	0,788%	0,728%	0,191%	26%
3960	0,669%	0,990%	0,465%	0,711%	0,785%	0,724%	0,190%	26%
4020	0,667%	0,987%	0,464%	0,708%	0,784%	0,722%	0,190%	26%
4080	0,666%	0,985%	0,462%	0,707%	0,784%	0,721%	0,190%	26%
4140	0,664%	0,985%	0,460%	0,701%	0,782%	0,719%	0,190%	27%
4200	0,662%	0,984%	0,457%	0,698%	0,780%	0,716%	0,191%	27%
4320	0,661%	0,982%	0,456%	0,694%	0,780%	0,715%	0,191%	27%
4440	0,659%	0,981%	0,454%	0,691%	0,777%	0,713%	0,191%	27%
4560	0,657%	0,978%	0,453%	0,687%	0,774%	0,710%	0,191%	27%
4680	0,655%	0,976%	0,451%	0,684%	0,772%	0,708%	0,191%	27%
4800	0,654%	0,974%	0,450%	0,681%	0,771%	0,706%	0,191%	27%
5100	0,652%	0,971%	0,450%	0,677%	0,769%	0,704%	0,190%	27%
5400	0,651%	0,970%	0,450%	0,674%	0,768%	0,702%	0,189%	27%
5700	0,650%	0,970%	0,450%	0,670%	0,768%	0,701%	0,189%	27%
6000	0,649%	0,968%	0,450%	0,667%	0,768%	0,700%	0,189%	27%
6300	0,648%	0,968%	0,450%	0,664%	0,766%	0,699%	0,189%	27%
6600	0,648%	0,968%	0,450%	0,662%	0,766%	0,699%	0,189%	27%
6900	0,648%	0,968%	0,450%	0,662%	0,766%	0,699%	0,189%	27%
7200	0,648%	0,968%	0,450%	0,662%	0,766%	0,699%	0,189%	27%





PPGECA

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil e Ambiental

GEOPAV

Laboratório de Geotecnia e Pavimentação
Universidade Federal de Sergipe

CREEP ESTÁTICO

Projeto: Dissertação de mestrado - Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente

Interessado: Rodrigo Dias Freitas

Método: GEOPAV

Material: Corpos-de-prova moldados no CGS/LMP/UFC - Mistura de referência Agregados da Emurb - Aracaju; CAP 50/70 da RLAM; Resíduos de gesso de obras residenciais de Aracaju

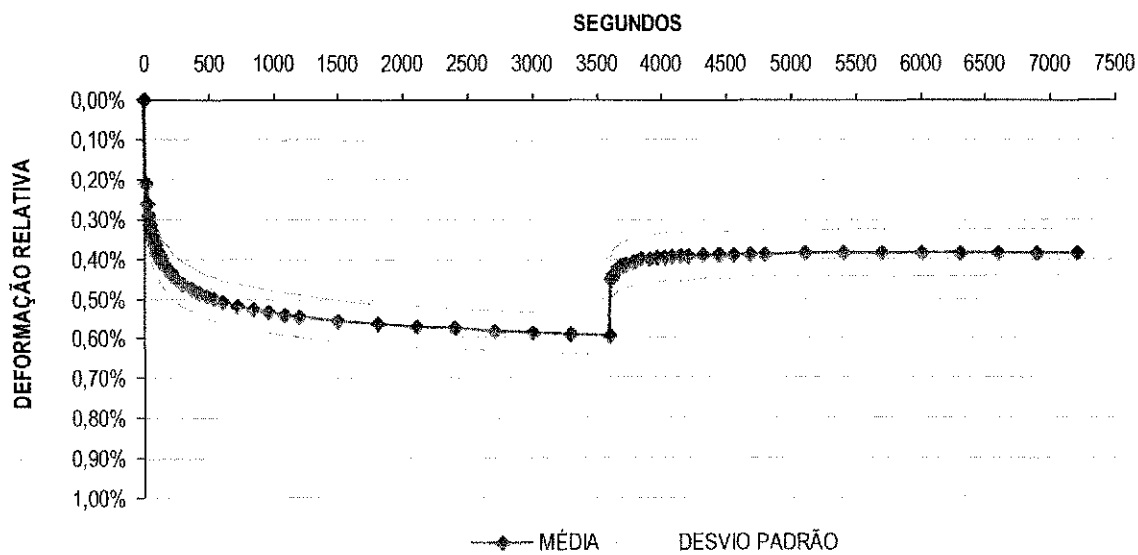
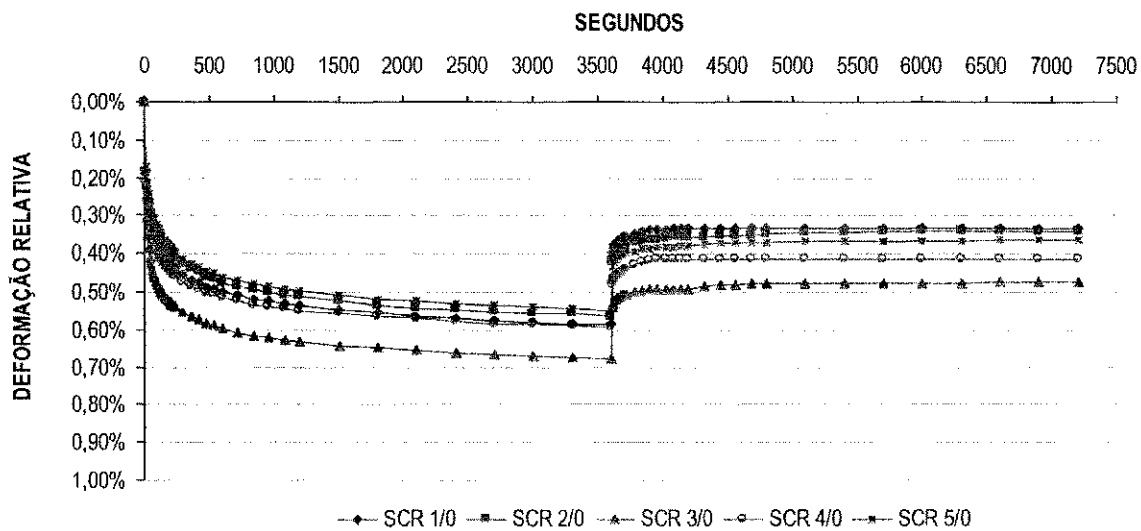
Origem:

Data do ensaio: Janeiro de 2010

Operador: Rodrigo Dias Freitas

SEGUNDOS	DEFOMAÇÃO RELATIVA (%)					MÉDIA	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
	SCR 1/0	SCR 2/0	SCR 3/0	SCR 4/0	SCR 5/0			
0	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	
10	0,184%	0,185%	0,308%	0,215%	0,169%	0,212%	0,056%	26%
20	0,243%	0,224%	0,354%	0,263%	0,214%	0,259%	0,056%	22%
30	0,268%	0,250%	0,386%	0,295%	0,244%	0,289%	0,058%	20%
40	0,292%	0,273%	0,412%	0,319%	0,263%	0,312%	0,060%	19%
50	0,314%	0,290%	0,427%	0,335%	0,278%	0,329%	0,059%	18%
60	0,326%	0,302%	0,441%	0,355%	0,292%	0,343%	0,060%	17%
70	0,338%	0,312%	0,454%	0,367%	0,304%	0,355%	0,060%	17%
80	0,351%	0,324%	0,463%	0,372%	0,312%	0,364%	0,060%	16%
90	0,361%	0,336%	0,474%	0,384%	0,324%	0,376%	0,059%	16%
100	0,369%	0,341%	0,480%	0,392%	0,332%	0,383%	0,059%	15%
110	0,380%	0,350%	0,489%	0,399%	0,338%	0,391%	0,060%	15%
120	0,384%	0,355%	0,492%	0,407%	0,344%	0,396%	0,059%	15%
130	0,389%	0,359%	0,498%	0,413%	0,352%	0,402%	0,059%	15%
140	0,397%	0,370%	0,506%	0,418%	0,357%	0,409%	0,059%	14%
150	0,401%	0,373%	0,509%	0,425%	0,363%	0,414%	0,058%	14%
160	0,407%	0,379%	0,514%	0,430%	0,367%	0,420%	0,058%	14%
170	0,412%	0,386%	0,520%	0,433%	0,370%	0,424%	0,059%	14%
180	0,415%	0,387%	0,523%	0,438%	0,375%	0,428%	0,059%	14%
190	0,418%	0,390%	0,526%	0,442%	0,381%	0,432%	0,058%	13%
200	0,424%	0,398%	0,529%	0,445%	0,384%	0,436%	0,057%	13%
210	0,427%	0,401%	0,534%	0,448%	0,387%	0,439%	0,058%	13%
220	0,430%	0,403%	0,537%	0,451%	0,390%	0,442%	0,058%	13%
230	0,433%	0,406%	0,538%	0,456%	0,395%	0,446%	0,057%	13%
240	0,438%	0,410%	0,540%	0,459%	0,398%	0,449%	0,056%	12%
300	0,455%	0,427%	0,555%	0,474%	0,413%	0,465%	0,056%	12%
360	0,467%	0,440%	0,567%	0,484%	0,426%	0,477%	0,056%	12%
420	0,478%	0,447%	0,575%	0,493%	0,433%	0,485%	0,055%	11%
480	0,487%	0,461%	0,584%	0,504%	0,444%	0,496%	0,054%	11%
540	0,493%	0,464%	0,590%	0,508%	0,450%	0,501%	0,055%	11%
600	0,501%	0,475%	0,598%	0,516%	0,460%	0,510%	0,054%	11%
720	0,508%	0,484%	0,607%	0,525%	0,469%	0,519%	0,054%	10%
840	0,518%	0,494%	0,615%	0,534%	0,476%	0,527%	0,054%	10%
960	0,524%	0,500%	0,621%	0,537%	0,486%	0,534%	0,053%	10%
1080	0,533%	0,509%	0,629%	0,544%	0,492%	0,541%	0,053%	10%
1200	0,536%	0,512%	0,632%	0,550%	0,496%	0,545%	0,053%	10%
1500	0,548%	0,524%	0,644%	0,557%	0,509%	0,557%	0,053%	9%
1800	0,556%	0,537%	0,649%	0,567%	0,519%	0,566%	0,050%	9%

2100	0,565%	0,541%	0,657%	0,571%	0,524%	0,572%	0,051%	9%
2400	0,570%	0,548%	0,661%	0,579%	0,532%	0,578%	0,050%	9%
2700	0,576%	0,554%	0,666%	0,583%	0,536%	0,583%	0,050%	9%
3000	0,580%	0,557%	0,672%	0,586%	0,539%	0,587%	0,051%	9%
3300	0,583%	0,560%	0,675%	0,590%	0,544%	0,590%	0,051%	9%
3600	0,587%	0,566%	0,678%	0,593%	0,550%	0,595%	0,050%	8%
3610	0,394%	0,424%	0,540%	0,482%	0,435%	0,455%	0,057%	13%
3620	0,384%	0,418%	0,530%	0,474%	0,423%	0,446%	0,057%	13%
3630	0,377%	0,409%	0,524%	0,465%	0,416%	0,438%	0,058%	13%
3640	0,372%	0,401%	0,521%	0,461%	0,413%	0,434%	0,058%	13%
3650	0,369%	0,396%	0,517%	0,459%	0,412%	0,431%	0,058%	14%
3660	0,366%	0,393%	0,514%	0,458%	0,407%	0,428%	0,058%	14%
3670	0,363%	0,389%	0,511%	0,454%	0,404%	0,424%	0,059%	14%
3680	0,360%	0,387%	0,509%	0,450%	0,403%	0,422%	0,059%	14%
3690	0,358%	0,386%	0,507%	0,448%	0,401%	0,420%	0,059%	14%
3700	0,358%	0,384%	0,507%	0,447%	0,400%	0,419%	0,059%	14%
3710	0,357%	0,384%	0,506%	0,445%	0,398%	0,418%	0,059%	14%
3720	0,355%	0,383%	0,506%	0,444%	0,398%	0,417%	0,059%	14%
3780	0,348%	0,370%	0,500%	0,430%	0,395%	0,408%	0,059%	15%
3840	0,342%	0,369%	0,495%	0,422%	0,387%	0,403%	0,059%	15%
3900	0,338%	0,366%	0,494%	0,418%	0,386%	0,400%	0,060%	15%
3960	0,337%	0,362%	0,492%	0,413%	0,384%	0,398%	0,060%	15%
4020	0,335%	0,359%	0,492%	0,413%	0,384%	0,397%	0,061%	15%
4080	0,334%	0,356%	0,492%	0,413%	0,383%	0,396%	0,062%	16%
4140	0,334%	0,356%	0,491%	0,413%	0,381%	0,395%	0,061%	15%
4200	0,334%	0,355%	0,491%	0,413%	0,381%	0,395%	0,061%	16%
4320	0,334%	0,355%	0,483%	0,413%	0,377%	0,392%	0,059%	15%
4440	0,334%	0,353%	0,480%	0,413%	0,373%	0,391%	0,058%	15%
4560	0,334%	0,352%	0,480%	0,413%	0,372%	0,390%	0,058%	15%
4680	0,334%	0,352%	0,478%	0,413%	0,372%	0,390%	0,058%	15%
4800	0,334%	0,350%	0,478%	0,413%	0,370%	0,389%	0,058%	15%
5100	0,334%	0,346%	0,477%	0,413%	0,369%	0,388%	0,058%	15%
5400	0,334%	0,344%	0,477%	0,413%	0,369%	0,387%	0,059%	15%
5700	0,334%	0,342%	0,477%	0,413%	0,369%	0,387%	0,059%	15%
6000	0,334%	0,342%	0,475%	0,413%	0,367%	0,386%	0,058%	15%
6300	0,334%	0,341%	0,475%	0,413%	0,367%	0,386%	0,059%	15%
6600	0,334%	0,341%	0,474%	0,413%	0,366%	0,385%	0,058%	15%
6900	0,334%	0,339%	0,474%	0,413%	0,366%	0,385%	0,059%	15%
7200	0,334%	0,339%	0,474%	0,413%	0,366%	0,385%	0,059%	15%





PPGECA

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil e Ambiental

GEOPAV

Laboratório de Geotecnia e Pavimentação
Universidade Federal de Sergipe

CREEP ESTÁTICO

Projeto: Dissertação de mestrado - Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente

Interessado: Rodrigo Dias Freitas

Método: GEOPAV

Material: Corpos-de-prova moldados no CGS/LMP/UFC - Mistura 2% de gesso Agregados da Emurb - Aracaju; CAP 50/70 da RLAM; Resíduos de gesso de obras residenciais de Aracaju

Origem:

Data do ensaio: Janeiro de 2010

Operador: Rodrigo Dias Freitas

SEGUNDOS	DEFOMAÇÃO RELATIVA (%)					MÉDIA	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
	SCR 1/2	SCR 2/2	SCR 3/2	SCR 4/2	SCR 5/2			
0	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	
10	0,201%	0,125%	0,307%	0,177%	0,147%	0,191%	0,071%	37%
20	0,225%	0,161%	0,356%	0,226%	0,178%	0,229%	0,076%	33%
30	0,240%	0,184%	0,385%	0,257%	0,209%	0,255%	0,078%	31%
40	0,251%	0,203%	0,407%	0,281%	0,228%	0,274%	0,080%	29%
50	0,263%	0,217%	0,422%	0,300%	0,242%	0,289%	0,080%	28%
60	0,271%	0,231%	0,434%	0,315%	0,256%	0,301%	0,080%	27%
70	0,279%	0,239%	0,447%	0,330%	0,267%	0,312%	0,082%	26%
80	0,284%	0,250%	0,457%	0,341%	0,278%	0,322%	0,083%	26%
90	0,293%	0,259%	0,465%	0,352%	0,284%	0,331%	0,083%	25%
100	0,296%	0,267%	0,474%	0,360%	0,293%	0,338%	0,083%	25%
110	0,302%	0,273%	0,479%	0,369%	0,298%	0,344%	0,083%	24%
120	0,294%	0,281%	0,486%	0,377%	0,307%	0,349%	0,085%	24%
130	0,310%	0,284%	0,493%	0,383%	0,312%	0,356%	0,085%	24%
140	0,313%	0,292%	0,499%	0,387%	0,316%	0,361%	0,085%	23%
150	0,318%	0,297%	0,503%	0,395%	0,323%	0,367%	0,085%	23%
160	0,324%	0,300%	0,506%	0,400%	0,326%	0,371%	0,084%	23%
170	0,325%	0,306%	0,511%	0,403%	0,329%	0,375%	0,085%	23%
180	0,329%	0,311%	0,516%	0,410%	0,334%	0,380%	0,085%	22%
190	0,332%	0,314%	0,520%	0,415%	0,338%	0,384%	0,086%	22%
200	0,336%	0,315%	0,522%	0,418%	0,341%	0,387%	0,085%	22%
210	0,339%	0,318%	0,525%	0,423%	0,343%	0,390%	0,085%	22%
220	0,341%	0,323%	0,529%	0,429%	0,346%	0,394%	0,086%	22%
230	0,342%	0,326%	0,532%	0,430%	0,351%	0,396%	0,086%	22%
240	0,346%	0,329%	0,536%	0,433%	0,354%	0,400%	0,086%	22%
300	0,358%	0,343%	0,548%	0,453%	0,369%	0,414%	0,086%	21%
360	0,370%	0,356%	0,557%	0,466%	0,382%	0,426%	0,085%	20%
420	0,375%	0,364%	0,568%	0,480%	0,389%	0,435%	0,087%	20%
480	0,386%	0,373%	0,579%	0,489%	0,400%	0,445%	0,087%	20%
540	0,390%	0,382%	0,585%	0,495%	0,405%	0,451%	0,087%	19%
600	0,397%	0,389%	0,589%	0,503%	0,411%	0,458%	0,087%	19%
720	0,404%	0,396%	0,600%	0,515%	0,422%	0,468%	0,088%	19%
840	0,412%	0,406%	0,608%	0,523%	0,431%	0,476%	0,087%	18%
960	0,417%	0,411%	0,614%	0,535%	0,436%	0,482%	0,089%	18%
1080	0,423%	0,420%	0,620%	0,539%	0,445%	0,489%	0,088%	18%
1200	0,428%	0,423%	0,625%	0,546%	0,450%	0,494%	0,088%	18%
1500	0,437%	0,434%	0,632%	0,558%	0,461%	0,504%	0,087%	17%
1800	0,445%	0,439%	0,641%	0,569%	0,465%	0,512%	0,090%	17%

CARREGAMENTO

2100	0,449%	0,443%	0,646%	0,573%	0,473%	0,517%	0,089%	17%
2400	0,454%	0,451%	0,649%	0,581%	0,479%	0,523%	0,088%	17%
2700	0,459%	0,454%	0,654%	0,586%	0,482%	0,527%	0,089%	17%
3000	0,463%	0,456%	0,658%	0,590%	0,486%	0,531%	0,089%	17%
3300	0,465%	0,459%	0,661%	0,596%	0,492%	0,535%	0,090%	17%
3600	0,468%	0,464%	0,663%	0,599%	0,495%	0,538%	0,089%	17%
3610	0,356%	0,309%	0,539%	0,400%	0,388%	0,398%	0,086%	22%
3620	0,350%	0,303%	0,529%	0,392%	0,375%	0,390%	0,085%	22%
3630	0,346%	0,300%	0,523%	0,387%	0,371%	0,385%	0,084%	22%
3640	0,342%	0,297%	0,519%	0,384%	0,366%	0,382%	0,083%	22%
3650	0,341%	0,295%	0,517%	0,383%	0,360%	0,379%	0,084%	22%
3660	0,338%	0,293%	0,516%	0,380%	0,357%	0,377%	0,084%	22%
3670	0,336%	0,292%	0,514%	0,378%	0,355%	0,375%	0,084%	22%
3680	0,335%	0,290%	0,513%	0,375%	0,354%	0,373%	0,084%	22%
3690	0,333%	0,289%	0,509%	0,372%	0,352%	0,371%	0,083%	22%
3700	0,332%	0,289%	0,509%	0,370%	0,351%	0,370%	0,084%	23%
3710	0,330%	0,287%	0,508%	0,369%	0,347%	0,368%	0,084%	23%
3720	0,329%	0,286%	0,506%	0,366%	0,344%	0,366%	0,084%	23%
3780	0,322%	0,279%	0,502%	0,358%	0,340%	0,360%	0,084%	23%
3840	0,318%	0,276%	0,494%	0,355%	0,334%	0,355%	0,083%	23%
3900	0,316%	0,275%	0,491%	0,353%	0,330%	0,353%	0,082%	23%
3960	0,313%	0,273%	0,491%	0,352%	0,327%	0,351%	0,083%	24%
4020	0,311%	0,272%	0,490%	0,350%	0,326%	0,350%	0,083%	24%
4080	0,310%	0,270%	0,488%	0,347%	0,324%	0,348%	0,083%	24%
4140	0,307%	0,267%	0,486%	0,344%	0,323%	0,345%	0,084%	24%
4200	0,305%	0,265%	0,483%	0,341%	0,321%	0,343%	0,083%	24%
4320	0,302%	0,264%	0,479%	0,340%	0,318%	0,340%	0,082%	24%
4440	0,302%	0,262%	0,477%	0,338%	0,316%	0,339%	0,082%	24%
4560	0,301%	0,262%	0,477%	0,337%	0,313%	0,338%	0,082%	24%
4680	0,301%	0,261%	0,477%	0,337%	0,312%	0,337%	0,083%	25%
4800	0,299%	0,261%	0,476%	0,337%	0,312%	0,337%	0,082%	24%
5100	0,296%	0,258%	0,474%	0,335%	0,310%	0,335%	0,083%	25%
5400	0,294%	0,256%	0,473%	0,332%	0,309%	0,333%	0,083%	25%
5700	0,291%	0,254%	0,471%	0,330%	0,307%	0,331%	0,083%	25%
6000	0,290%	0,253%	0,470%	0,327%	0,307%	0,329%	0,083%	25%
6300	0,290%	0,253%	0,470%	0,326%	0,307%	0,329%	0,083%	25%
6600	0,290%	0,253%	0,468%	0,326%	0,306%	0,328%	0,082%	25%
6900	0,288%	0,251%	0,466%	0,324%	0,306%	0,327%	0,082%	25%
7200	0,288%	0,251%	0,466%	0,324%	0,304%	0,327%	0,083%	25%

