

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE FRESAGEM DE PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS EM BASES ESTABILIZADAS
GRANULOMETRICAMENTE E EM REVESTIMENTOS
ASFÁLTICOS NA CIDADE DE MANAUS

EDUARDO SOUZA DA SILVA

MANAUS
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EDUARDO SOUZA DA SILVA

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE FRESAGEM DE PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS EM BASES ESTABILIZADAS
GRANULOMETRICAMENTE E EM REVESTIMENTOS
ASFÁLTICOS NA CIDADE DE MANAUS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração de materiais.

Orientador: Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo

MANAUS
2013

Ficha Catalográfica
(Catalogação realizada pela Biblioteca Central da UFAM)

S586u Silva, Eduardo Souza da
Utilização de resíduo de fresagem de pavimentos asfálticos em bases estabilizadas granulometricamente e em revestimentos asfálticos na cidade de Manaus / Eduardo Souza da Silva. – 2013.
219 f. : 2l. Color. ; 31 cm.
Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Amazonas.
Orientador: Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo.

1. Pavimentos de asfalto – Manaus (AM) 2. Pavimentos flexíveis
3. Asfalto – Reaproveitamento 4. Produtos reciclados 5. Revestimentos
I. Campelo, Nilton de Souza, orientador II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

CDU (2007): 625.85(811.3)(043.3)



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº. 05/2013

ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO AO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

DATA DO EXAME: 29/11/2013

DISCENTE: EDUARDO SOUZA DA SILVA

ORIENTADOR: NILTON DE SOUZA CAMPELO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo (Presidente)

Prof. Dr. José Tadeu Balbo (Membro Externo)

Prof. Dr. Júlio Augusto de Alencar Junior (Membro Externo)

Profa. Dra. Liedi Legi Bariani Bernucci (Membro Externo)

TÍTULO DA PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO: "REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO PELA FRESAGEM DE PAVIMENTO ASFALTICO, NA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE BASE E RECAPEAMENTO DE VIAS DE ROLAMENTO DA CIDADE DE MANAUS".

LOCAL: Sala de Aula Pós-Graduação do Bloco Prof. Vilar Fiuza da Câmara, da Faculdade de Tecnologia – Setor Norte Campus Universitário da UFAM. HORA DE INÍCIO: 15h.

De acordo com o Regimento Interno do *Programa Pós – Graduação em Engenharia Civil*, aprovados pelo Conselho de Ensino e Pesquisa/CONSEP/UFAM e CAPES, o (a) aluno (a) submeteu sua dissertação em forma escrita e oral, sendo após exposição de cerca de 45 minutos argüido oralmente pelos membros da banca, tendo tido como resultado:

☒ *Aprovação por unanimidade de sua dissertação. O (A) aluno (a) foi considerado aprovado, podendo pleitear o título de Mestre.*

☐ *Reprovação de sua Dissertação. O (A) aluno (a) não foi considerado aprovado (a) na sua Defesa de Dissertação. Não podendo pleitear o título de Mestre.*

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que será assinada pelos membros da banca e pelo (a) aluno (a).

Observações *O CANDIDATO DELETA SEGUIR AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA, NA DEFESA DE SUA DISSERTAÇÃO.*

Manaus, 29 de Novembro de 2013.

Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo - (UFAM) Presidente

Prof. Dr. José Tadeu Balbo – (USP) Membro Externo

Prof. Dr. Júlio Augusto de Alencar Junior – (UFPA) Membro Externo

Profa. Dra. Liedi Legi Bariani Bernucci – (USP) Membro Externo

Eduardo Souza Da Silva (Discente)

Dedico esta Dissertação a Deus, a minha família, a minha mãe Conceição Souza da Silva e ao meu orientador que tanto acreditou em minha pessoa, mesmo em tantas dificuldades, que auxiliaram em muito ao meu engrandecimento pessoal e intelectual.

Agradecimentos

Talvez esta seja a página mais difícil de ser escrita, pelo simples fato que são tantos para agradecer, tantos para serem apenas lembrados e outros tantos que merecem muito mais que um simples nome citado nesta página. Então peço desculpas pelos que por ventura venha esquecer.

À DEUS em primeiro lugar.

À minha família, em especial à minha mãe Conceição, pela sua eterna preocupação.

À Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de Tecnologia Programa de pós – Graduação em Engenharia Civil- PPGEC, pela oportunidade de estudar nesta prestigiosa instituição.

Ao meu Orientador: Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo, com quem sempre me senti à vontade. Obrigado por ter acreditado em mim. Obrigado, além dos ensinamentos e por tudo que consegui aprender.

À Professora Laura Maria Goretti da Motta, por ter me permitido ser mais um dos seus Co-orientados na UFRJ/COPPE quando lá estive, está por demais falar do seu grande profissionalismo, foi para mim um grande privilégio e ao pessoal do laboratório de geotecnia da COPPE.

Aos professores do PPGEC/UFAM, pelas aulas ministradas, e pelos quais guardo grande respeito, apreço e admiração.

À Banca Examinadora da qualificação pelas sugestões ao presente trabalho.

A todos os colegas do Laboratório de Mecânica dos solos FT/UFAM, em especial para o meu amigo Antonio Reinaldo ao Zeca não esquecendo a dona Ray pelo seu café que tanto me deixou acordado nas horas de confecção dos ensaios, assim como aos demais colegas de turma.

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE FRESAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EM BASES ESTABILIZADAS GRANULOMETRICAMENTE E EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS NA CIDADE DE MANAUS

Eduardo Souza da Silva

Novembro/2013

Orientador: Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo

Programa: Engenharia Civil

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar a reutilização do resíduo fresado do pavimento asfáltico retirado nas manutenções de vias urbanas. Nesse processo de estudo, foram analisados os agregados e o cimento asfáltico de petróleo (CAP) envelhecido, oriundos de pavimento deteriorado e posteriormente fresado, através de análises e ensaios de laboratórios segundo as normas brasileiras (NBR) correspondentes a cada material aplicado na produção das camadas do pavimento, no que diz respeito à confecção de base e ao revestimento asfáltico. Também foram analisados os métodos de dosagem para a produção das misturas com o resíduo fresado de pavimento asfáltico e suas respectivas porcentagens com o solo puro, este último caracterizado como um solo de baixa capacidade de suporte, no intuito de alcançar a melhor resistência, proporcionando uma maior durabilidade nas camadas subjacentes e ao reaproveitamento do mesmo material fresado para o revestimento asfáltico dessas camadas, com uma economia significativa nas suas possíveis aplicações em manutenções futuras. Assim, pode-se aproveitar esse material para estabilizar um solo que não atendia os requisitos necessários exigidos pelas normas regulamentadoras para esses fins, e no intuito de dar a devida importância na preocupação com as questões ambientais, que

estão sendo abordadas de forma bastante acentuada nos dias atuais, minimizando a degradação de jazidas de areia e leitos de rios no que tange à retirada de seixo rolado, diminuindo assim os custos de logística, transporte e a aquisição de novos agregados.

Os resultados experimentais da mistura asfáltica reciclada a 100%, do resíduo fresado do pavimento asfáltico, avaliadas nessa pesquisa foram comparados com os resultados obtidos para misturas convencionais e indicaram que tal mistura pode ser usada como alternativa para revestimento de vias urbanas, atendendo os requisitos exigidos em normas referentes ao assunto.

As misturas solo de referência com resíduo fresado do pavimento asfáltico (RFA) apresentaram um comportamento mecânico compatível com as exigências de um pavimento de volume de tráfego pesado. Os resultados obtidos foram satisfatórios, ressaltando o emprego positivo do RFA para aplicação em camadas de base de pavimentos urbanos. Ressalta-se que os estudos sobre a utilização desse tipo de resíduo em pavimentação, são raros na cidade de Manaus e essa pesquisa agrega um conhecimento exploratório do potencial de sua aplicabilidade.

Palavra chave: *Pavimento de asfalto, Pavimento flexíveis, Produtos reciclados, Revestimentos.*

ABSTRACT

This work aimed to study the reuse of the milled residue of asphalt pavement removed during maintenance of urban roads. In this case study, aggregates and asphalt cement oil (CAP) aged, coming from damaged and subsequently milled through analysis and testing laboratories pavement were analyzed according to each material corresponding to Brazilian Standards (NBR) used in the production of layers the deck, as regards the manufacture of the base and the asphalt coating. The measurement methods for the production of milled mixtures with residual asphalt pavement and their percentages with pure soil were also analyzed, the latter characterized as a low soil bearing capacity in order to achieve the best strength, providing a durability in the underlying layers and reuse of the same milled material for asphalt coating of these layers, with significant savings on their possible applications in future maintenance. Thus, one can avail this stuff to stabilize a soil that did not meet the necessary requirements of the regulatory standards for such purposes, and intuited to give due importance to the concern for environmental issues, which are being addressed particularly sharply in today, minimizing the degradation of deposits of sand and river beds in relation to the removal of boulder, thus decreasing logistics costs, transportation and acquisition of new ones.

The experimental results of recycled asphalt mixture to 100% of the milled asphalt pavement waste, evaluated in this study were compared with the results obtained for conventional mixtures and indicated that such a mixture can be used as an alternative for coating urban roads , given the conditions required in regulations on this matter.

The ground reference mixtures with milled asphalt pavement residue (RFA) were compatible with the demands of a pavement of heavy traffic volume mechanical behavior. The results were satisfactory, highlighting the positive use of the RFA for application in the base layers of urban pavements. It is noteworthy that studies on the use of this type of waste in pavement,

are rare in the city of Manaus and this research adds an exploratory knowledge of their potential applicability.

Keyword: Asphalt floor, Flexible Pavement, Recycled Products, Coatings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Camadas que compõem um pavimento flexível.....	26
Figura 2 - Cargas no pavimento flexível.....	31
Figura 3 - Esquema de dimensionamento mecânico de um pavimento.....	35
Figura 4 - Modelos de sistema de coordenadas utilizado pelo programa.....	41
Figura 5 - Procedimento de fresagem de pavimento no conjunto Manauense em Manaus.....	48
Figura 6 - Tipos de reciclagem de pavimentos flexíveis.....	49
Figura 7- Dispositivo de reciclagem <i>in situ</i>	53
Figura 8 - Esquema da operação da reciclagem a quente <i>in situ</i> com fresagem a quente.....	54
Figura 9 - Trem de reciclagem usado na FDR.....	58
Figura 10 - Esquemática do trem de reciclagem.....	59
Figura 11 - Deflectômetro de impacto.....	65
Figura 12 - Mapa de lineamento morfoestruturais da cidade de Manaus.....	78
Figura 13 - Mapa de correlação de lineamento morfoestruturais da cidade de Manaus.....	78
Figura 14 - Mapa, ilustrando o local da coleta do solo de referência.....	80
Figura 15 - Mapa de localização da coleta do resíduo produzido pela fresagem do pavimento asfáltico.....	81
Figuras 16 a 21 - Sequência dos ensaios de Massa específica e limites de consistência do solo de referência e das misturas com resíduo fresado do pavimento asfáltico.....	82
Figuras 22 a 24 - Sequência dos ensaios de Granulometria do solo de referência e das misturas com resíduo fresado do pavimento asfáltico.....	82
Figuras 25 a 30 - Sequência dos ensaios de Umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.....	83
Figuras 31 a 36 - Sequência dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC).....	84
Figuras 37 a 42 - Sequência dos ensaios de Resistência à Compressão Simples.....	86
Figuras 43 a 58 - Sequência dos ensaios de Módulo de Resiliência do solo de referência e das misturas com resíduo fresado do pavimento asfáltico.....	88
Figura 59 - Pesagem do corpo-de-prova após o ensaio de módulo de resiliência.....	94
Figura 60 - Corpo-de-prova em estufa após o ensaio de módulo de resiliência.....	94
Figura 61 - Equipamentos triaxiais de carga repetida de MR, ensaio realizado na COPPE/UFRJ.....	95
Figura 62 - Amostra de RFA	97

Figura 63 – Estufa para aquecer o RFA.....	97
Figura 64 - Extrator por centrifugação usado para extrair o CAP do RFA.....	98
Figura 65 - Ensaio para a determinação da massa específica da areia utilizando o frasco de Chapman.....	99
Figuras 66 a 77 - Sequência das confecções dos corpos-de-prova, método de dosagem Marshall.....	102
Figura 78 - Corpos-de-prova catalogados, prontos para os ensaios de MR e RT.....	104
Figura 79 - Equipamento triaxial de carga repetida de MR.....	106
Figura 80 - Prensa mecânica para ensaio compressão diametral.....	107
Figura 81 - Esquema do ensaio de fadiga por compressão diametral.....	109
Figura 82 - Ensaio de fadiga por compressão diametral.....	109
Figura 83 - Penetrômetro de ensaio de CAP.....	112
Figura 84 - Viscosímetro para ensaio de CAP.....	112
Figura 85 - Ensaio de ponto de amolecimento em execução.....	113
Figura 86 - Equipamento de ensaio de ponto de fulgor.....	114
Figura 87 - Curva granulométrica do solo de referência (M1).....	116
Figura 88 - Curva de compactação do solo de referência.....	117
Figura 89 - Curva granulométrica da mistura (M2).....	121
Figura 90 - Curva granulométrica da mistura (M3).....	122
Figura 91 - Curva granulométrica da mistura (M4).....	122
Figura 92- Curva granulométrica da mistura (M5).....	122
Figura 93 - Curva granulométrica da mistura (M6).....	123
Figura 94 - Curvas granulométricas conjuntas do solo de referência com as misturas.....	123
Figura 95 - Curva de compactação da mistura M2.....	124
Figura 96 - Curva de compactação da mistura M3.....	124
Figura 97 - Curva de compactação da mistura M4.....	125
Figura 98 - Curva de compactação da mistura M5.....	125
Figura 99 - Curva de compactação da mistura M6.....	125
Figura 100 - Curva de compactação conjuntas do solo de referência com as misturas.....	126
Figura 101- Gráfico dos ensaios do MR das misturas com seus desvios padrão.....	131
Figura 102 - Curva granulométrica do agregado miúdo - areia.....	133
Figura 103 - Curva granulométrica do agregado graúdo - seixo.....	134
Figura 104 - Enquadramento dos agregados do traço padrão do CAUQ na faixa C do DNIT.....	137

Figura 105- A composição granulométrica do RFA não atendeu o enquadramento da faixa C do DNIT.....	138
Figura 106 - Enquadramento dos agregados do traço com o RFA atendendo os parâmetros da na faixa C do DNIT.....	139
Figura 107 - Enquadramento da granulometria do traço padrão e a do traço com RFA na faixa C do DNIT.....	139
Figura 108 - Vida de fadiga versus diferença de tensões das misturas RFA e Padrão.....	145
Figura 109 - Vida de fadiga versus deformação específica resiliênte das misturas Padrão e RFPA.....	145
Figura 110 - Configura de eixos utilizada pelo programa SisPav.....	148
Figura 111 - Mapa de localização da Rua Araújo Filho.....	150
Figura 112 - Tela do SisPav utilizada para o cálculo de um tráfego meio pesado.....	151
Figura 113 - Informações referentes ao clima inseridos no programa SisPav.....	151
Figura 114 - Modelos de comportamento resiliente de materiais de pavimentação utilizado pelo.....	154
Figura 115 - Parâmetros da mistura reciclada do RFA inseridos no SisPav.....	156
Figura 116 - Tela do programa SISPAV - Critério de fadiga para dimensionamento de pavimento para o RFA reciclado.....	156
Figura 117 - Parâmetros da mistura M5 para o dimensionamento da base do pavimento.....	157
Figura 118 - Parâmetros do dimensionamento da sub-base do pavimento sugerido pelo SisPav.....	157
Figura 119 - Parâmetros sugeridos por Franco (2007) para o subleito.....	158
Figura 120 - Tela do programa SISPAV - Estrutura analisada no dimensionamento de pavimento para um volume de tráfego meio pesado.....	159
Figura 121- Mapa de localização das Avenidas Efigênio Sales e Humberto Calderaro Filho.....	160
Figura 122 - Tela do SisPav utilizada para o cálculo de um volume de tráfego muito pesado.....	161
Figura 123 - Tela do programa SISPAV- Estrutura analisada no dimensionamento de pavimento para volume do tráfego muito pesado.....	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Ensaaios físicos e químicos do cimento CP-II-Z-32.....	85
Tabela 2- Níveis de tensões aplicados na fase de condicionamento.....	95
Tabela 3- Níveis de tensões utilizados durante o ensaio triaxial dinâmico.....	96
Tabela 4- Ajuste do percentual em massa dos agregados em função do teor de CAP, traço padrão.....	101
Tabela 5- Ajuste do percentual em massa dos agregados em função do teor de CAP, traço RFPA.....	103
Tabela 6- Simbologia do solo de referência e suas respectivas misturas com RFA.....	115
Tabela 7- Resultado dos ensaios de massa específica e limite de consistência do solo de referência.....	115
Tabela 8- Composição granulométrica do solo de referência.....	116
Tabela 9- Resultado da umidade ótima e massa específica aparente seca do solo.....	118
Tabela 10- Valores da Expansão e ISC do solo de referência.....	118
Tabela 11- Parâmetros de norma para materiais de base.....	119
Tabela 12 - Valores da granulometria do RFA antes e após a extração do CAP.....	120
Tabela 13 - Resultado dos ensaios de massa específica e limite de consistência das misturas com o RFA.....	121
Tabela 14 - Composição granulométrica das misturas com o RFA.....	123
Tabela 15 - Resultado da umidade ótima e massa específica aparente seca das misturas com RFPA.....	127
Tabela 16 - Valores da Expansão e ISC das misturas com RFA.....	128
Tabela 17 - Parâmetros de norma para materiais de base.....	128
Tabela 18 - Resultado dos ensaios de resistência à compressão simples.....	130
Tabela 19 - Resultado dos ensaios do MR.....	131
Tabela 20 - valores de W_{ot} , $p_{dmáx}$, $p_{dmáx}$, ISC e MR de diversos autores, para misturas de solo.....	132
Tabela 21- Composição granulométrica do agregado miúdo - areia.....	133
Tabela 22 - Composição granulométrica do agregado graúdo - seixo.....	134
Tabela 23 - Características do CAP 50/70.....	136
Tabela 24 - Composição granulométrica do traço padrão do CAUQ na faixa C do DNIT....	137

Tabela 25 - Composição granulométrica do RFA sem a correção com agregado graúdo (seixo).....	137
Tabela 26 - Correção com agregado graúdo (seixo) da composição granulométrica do RFPA.....	138
Tabela 27 - Média dos resultados do traço padrão.....	140
Tabela 28 - Média dos resultados do traço com RFA.....	140
Tabela 29 - Média dos resultados encontrados com o Teor Ótimo de CAP para os traços Padrão e com RFA.....	141
Tabela 30 - Resultado do ensaio de módulo de resiliência e resistência à tração para o traço padrão.....	142
Tabela 31- Resultado do ensaio de módulo de resiliência e resistência à tração para o traço com RFA.....	143
Tabela 32 - Resultado dos ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração de vários autores.....	143
Tabela 33 - Resultados de vida de fadiga.....	146
Tabela 35 - Resumo dos resultados do programa SisPav após a análise do dimensionamento das camadas do pavimento para um tráfego meio pesado.....	159
Tablas 36 - Resumo dos resultados do programa Sispav após a análise do dimensionamento das camadas do pavimento para tráfego muito pesado.	
Tabela 37 - Resumo dos resultados do programa Sispav após a análise do dimensionamento das camadas do pavimento, vida de projeto em anos.	

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVO GERAL.....	19
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	19
1.3 Organização da pesquisa.....	20
2 JUSTIFICATIVA.....	21
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
3.1 Camadas dos pavimentos flexíveis.....	25
3.1.1 Revestimento asfáltico.....	26
3.1.2 Camadas de base e sub-base de pavimento.....	28
3.1.3 Subleito.....	29
3.2 Projeto de pavimento flexível: breve abordagem.....	30
3.2.1 Método Mecanístico.....	32
3.2.2 Módulo de Resiliência.....	36
3.3 Programas de Análises de Tensões.....	39
3.3.1 Definição de estratégias de manutenção.....	44
3.3.2 Reciclagem de pavimentos e o emprego da fresagem.....	45
3.3.3 Fresagem: conceitos básicos.....	47
3.3.3.1 Reciclagem a frio na usina.....	49
3.3.3.2 Reciclagem a quente.....	53
3.3.3.3 Reciclagem a quente <i>in situ</i>	53
3.3.3.4 <i>Full depth reclamation</i> - FDR.....	54
3.3.4 Reciclagem de camadas do pavimento.....	60
3.3.5 Granulometria do material fresado para fins de reciclagem.....	61
3.4 Aplicação da técnica de fresagem.....	61
3.4.1 Utilização de resíduos em camadas de base e sub-base.....	64
3.4.2 Estabilizações de solos.....	68
3.4.3 Estabilização mecânica.....	69
3.4.4 Estabilização física.....	70
3.4.5 Estabilização química.....	71
3.4.6 Solo-cimento.....	72
3.4.7 Solo-cal.....	74

3.5 Solos da cidade de Manaus.....	76
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	79
4.1 Considerações gerais.....	79
4.2 Origem e características físicas do solo utilizado.....	80
4.2.1 Origem.....	80
4.2.2 Massa específica e limites de consistência do solo de referência e das misturas com resíduo fresado do pavimento asfáltico.....	81
4.2.3 Granulometria do solo de referência e das misturas com resíduo fresado do pavimento asfáltico.....	82
4.2.4 Umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.....	83
4.2.5 Índice de Suporte Califórnia (ISC).....	84
4.2.6 Cimento.....	85
4.2.7 Resistência à Compressão Simples.....	86
4.2.8 Módulo de Resiliência do solo de referência e das misturas com RFA.....	87
4.2.9 Caracterização do resíduo produzido pela fresagem do pavimento asfáltico.....	96
4.2.9.1 Análise granulométrica por peneiramento.....	96
4.2.9.2 Determinação do teor de CAP.....	97
4.2.9.3 Determinação da massa específica real, massa específica aparente e absorção do agregado graúdo (seixo).....	98
4.2.9.4 Massa específica do agregado miúdo (areia).....	99
4.2.9.5 Misturas asfálticas a quente.....	100
4.2.9.6 Moldagem dos corpos-de-prova em laboratório.....	100
4.3 Ensaio mecânicos.....	104
4.3.1 Módulo de Resiliência de misturas asfáltica.....	104
4.3.2 Resistência à tração por compressão diametral.....	106
4.3.3 Ensaio de fadiga por compressão diametral.....	108
4.3.4 Ligantes asfálticos.....	110
4.3.4.1 Generalidades.....	110
4.3.4.2 Ensaio de caracterização do CAP.....	111
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	115
5.1 Massa específica e limites de consistência do solo de referência.....	115
5.1.1 Granulometria do solo de referência.....	116

5.1.2 Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca Máxima do solo de referência.....	117
5.1.3 Índice de Suporte Califórnia (ISC) do solo de referência.....	118
5.2 Resíduo fresado do pavimento asfáltico (RFA).....	119
5.2.1 Análise granulométrica por peneiramento antes e após a extração do CAP do resíduo fresado do pavimento asfáltico.....	119
5.4 Solo de referência estabilizado com RFA.....	120
5.4.1 Massa específica e limites de consistência das misturas com RFA.....	120
5.4.2 Granulometria das misturas do solo referência com RFA.....	121
5.4.3 Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca Máxima das misturas com RFA.....	124
5.4.4 Índice de Suporte Califórnia (ISC) das misturas com RFA.....	127
5.4.5 Resistência à compressão simples do solo de referência e das misturas com resíduo fresado do pavimento asfáltico.....	129
5.4.6 Determinação do Módulo de Resiliência do solo de referência e das misturas com resíduo fresado do pavimento asfáltico.....	130
5.5 Mistura asfáltica.....	132
5.5.1 Determinação do Teor de CAP contido no resíduo fresado do pavimento asfáltico.....	132
5.5.2 Composição granulométrica dos agregados gráudo e miúdo adicionados nas confecções das misturas asfálticas.....	133
5.5.2.1 Granulometria do agregado miúdo – areia.....	133
5.5.2.2 Granulometria do agregado gráudo – seixo.....	134
5.5.2.3 Massa específica do agregado miúdo - areia.....	135
5.5.2.4 Determinação da massa específica real, massa específica aparente e absorção do agregado gráudo (seixo).....	135
5.5.2.5 Características do CAP 50/70.....	135
5.5.3 Ensaio Marshall.....	136
5.5.4 Módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT) por compressão diametral.....	141
5.5.5 Ensaio de fadiga por compressão diametral.....	144
5.6 SIMULAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO PELA TEORIA MECANISTICA, EMPREGANDO O PROGRAMA COMPUTACIONAL SISPAV.....	147
5.6.1 Generalidades.....	147
5.6.2 Estudo de Tráfego.....	147

5.6.3 Dados sobre o ambiente proposto nesta dissertação.....	151
5.6.4 Fatores Climáticos Regionais.....	152
5.6.5 Materiais propostos nesta pesquisa.....	152
6 CONCLUSÕES.....	166
7 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	169
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	171
ANEXOS.....	177

1 INTRODUÇÃO

Hoje em dia, uma das estratégias para assegurar o crescimento sustentável de uma sociedade é a redução, a reutilização e a reciclagem da utilização dos recursos naturais. A disponibilidade desse tipo de recurso é limitada e cada vez mais escassa, o que faz com que engenheiros apontem propostas para a valorização dos materiais existentes, em vez do recurso sistemático à utilização de novos materiais ou a consequente deposição em aterros ou em locais impróprios de materiais não reutilizáveis (Fonseca, 2002).

As considerações iniciais dessa dissertação estão baseadas na preocupação com as questões ambientais, que estão sendo abordadas de forma bastante acentuada nos dias atuais. Neste contexto, a evolução da tecnologia está tomando caminhos que a levam a ter uma afinidade com o meio ambiente, minimizando os impactos ambientais.

A engenharia rodoviária, também responsável por parte desses impactos, vem inovando gradativamente no desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem minimizar os danos ao meio ambiente.

No Brasil, há um número reduzido de especificações técnicas desenvolvidas e/ou adotadas pelos órgãos rodoviários, para execução de serviços de restauração de pavimentos, contemplando a reciclagem do pavimento asfáltico, tornando difícil a elaboração de projetos deste tipo, como alternativa para a manutenção das rodovias. Nesse sentido, o presente estudo apresenta procedimentos de laboratório que podem ser aplicados no campo como elementos auxiliares, para assegurar a qualidade das obras rodoviárias que envolvam a restauração de estruturas de pavimentos, através da reciclagem do material fresado de base granular existente.

A indústria de transporte representa 3,5% do produto interno bruto (PIB) do Brasil. Visto que 60% das cargas são conduzidas por rodovias, tem-se que 2,1% do PIB brasileiro é em função do transporte rodoviário (Medina, 2005). Sendo assim, a malha rodoviária que

representa uma fração da nação deve operar de modo a aperfeiçoar os processos (transporte) que nela serão efetuados. No entanto, boa parte da rede pavimentada brasileira encontra-se deteriorada, exigindo grandes investimentos para execução de serviços de restauração (David, 2006). Entre os serviços de restauração, está a necessidade de se recuperar as condições de rolamento, ou seja, empreender obras de restauração de pavimento da via.

Assim, soluções devem ser estudadas de modo a aproveitar os recursos de maneira racional e eficiente. Desse modo, a reciclagem de materiais asfálticos vem sendo empregada nos processos de restauração rodoviária. Essa solução possibilita o reaproveitamento dos agregados e ligantes do pavimento deteriorados, conservando a geometria e espessura do pavimento existente, reduzindo custos e preservando o meio ambiente (David, 2006).

O pavimento é uma estrutura destinada aos esforços gerados pelo tráfego, garantindo durabilidade à superfície de rolamento, proporcionando conforto e segurança para o usuário (GONÇALVES, 1999). Com o passar do tempo, essas vias de rolamento vão se desgastando e, na maioria das vezes, a solução encontrada foi o recapeamento; entretanto, o desnível deixado entre as faixas de rolamento e o acostamento, devido às sucessivas camadas de revestimento asfáltico, sobrepostas uma sobre as outras, podem contribuir, assim, em possíveis acidentes. Quando as rodovias estão com os pavimentos envelhecidos e os desgastes são intensos, é inviável passar uma nova capa asfáltica. Assim, a solução utilizada normalmente para corrigir esse problema é a fresagem do pavimento, técnica que consiste em desbastar camadas do pavimento, utilizando uma fresadora asfáltica. O grande desafio é dar um destino razoável a esse material, que por muito tempo foi considerado um rejeito da construção civil. O material rejeitado é constituído de seixo rolado ou pedra britada, areia, filler (pó de pedra ou cimento) e cimento asfáltico de petróleo (CAP). Normalmente, esses materiais são descartados em aterros ou em bota-foras, determinados pela fiscalização da obra.

Diante da escassez de recursos financeiros para aplicação nos mais diversos setores e da necessidade da proteção ambiental, torna-se viável o uso de técnicas e materiais alternativos para pavimentação que consomem volumes consideráveis de material. O aproveitamento do Resíduo Fresado de Pavimento Asfáltico (RFA) é vantajoso para a indústria que gera este rejeito, como alternativa ao uso de estabilizantes convencionais como a cal, o cimento e outros, para solos de baixa capacidade de suporte; com isso, pode-se agregar valor ao rejeito e diminuir os gastos com a ocupação de áreas de deposição (aterros) e/ou tratamentos impostos pelas regras de proteção ambiental. Para a construção civil, o preço final dos materiais para pavimentação tende a diminuir, pelo reaproveitamento dos componentes originados do RFA, especialmente se forem tecnicamente competitivos com os estabilizantes convencionais.

Para que sejam concebidos novos materiais para pavimentação, é relevante que se conheçam as propriedades mecânicas e físicas dos materiais de constituição do pavimento fresado, bem como suas possíveis combinações. O conhecimento do mecanismo de estabilização é de grande importância no entendimento da resposta da mistura no que tange ao seu comportamento mecânico. Esse mecanismo depende de vários fatores relacionados com o solo e o RFA, como a faixa granulométrica, a densidade e a composição química, entre outros. Dentro desse contexto, o presente trabalho busca contribuir para melhor interpretação e compreensão do comportamento do solo estabilizado com o RFA, e seu uso em bases estabilizadas granulometricamente, podendo potencializar a sua utilização em obras de pavimentação urbana, dando um fim mais nobre a este material.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desta pesquisa é avaliar a utilização do resíduo fresado do pavimento asfáltico, oriundo da fresagem decorrente das atividades de manutenção e restauração de pavimentos flexíveis por fresagem, obtido nas vias de rolamento de Manaus, para aplicação como material de estabilização granulométrica em camadas de bases e revestimento de pavimentos urbanos.

1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO

- ✓ Avaliar as propriedades físicas dos materiais utilizados na pesquisa: material fresado, solo de referência;
- ✓ Avaliar as propriedades mecânicas do solo de referência e das misturas com material fresado para uso em bases e revestimentos de pavimentos urbanos;
- ✓ Verificar a viabilidade técnica da aplicação de misturas com material fresado, solo e aglomerantes (cimento), em relação às alternativas usuais, utilizadas para estabilização de solos de baixa capacidade de suporte;
- ✓ Sugerir uma destinação final ambientalmente adequada para a utilização do material fresado, proveniente das atividades de manutenção e restauração de pavimentos flexíveis.

1.3 Organização da pesquisa

O texto desta dissertação encontra-se em um volume único, distribuído da seguinte forma:

O Capítulo 1 apresenta uma visão geral da pesquisa com a introdução, os objetivos a serem alcançados e a forma de organização da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta a justificativa desta pesquisa

O Capítulo 3 constrói a Fundamentação Teórica e nele são discutidos e descritos assuntos relacionados a pavimentos, camadas de base e sub-base de pavimentação, fresagem, reciclagem de pavimentos e, por fim, estabilização de solos para uso em pavimentação.

No Capítulo 4, intitulado de Materiais e Métodos, são relatados aspectos considerados importantes sobre os procedimentos dos ensaios e o método da pesquisa.

O Capítulo 5 faz a apresentação e análise dos resultados obtidos durante a fase experimental, faz-se referência ao programa SisPav, para uma análise mais adequada dos resultados, através de simulações para o dimensionamento de pavimentos asfáltico desenvolvido por FRANCO (2007).

No Capítulo 6 encontram-se as conclusões da pesquisa.

O Capítulo 7 apresenta as sugestões para futuras pesquisas sobre o tema estudado.

Por fim, estão incluídas as referências bibliográficas e os anexos, onde foram inseridas as referências citadas para a realização da pesquisa, as planilhas e os gráficos resultantes dos ensaios realizados.

2 JUSTIFICATIVA

Rotineiramente, prefeituras, governos estaduais e governo federal utilizam o serviço de recapeamento das rodovias para fazer manutenção de trechos danificados. Os resíduos fresados do pavimento asfáltico estão presentes especialmente em grandes e médias cidades, quando da restauração de pavimentos urbanos, não se dando a devida atenção às exigências quanto ao alteamento do greide da plataforma viária, que causa situações indesejáveis, em especial nas junções com soleiras, guias e sarjetas, além de outras interferências. Mas, ao passar do tempo, percebe-se que, devido às exigências de tráfego, pelo excesso de carga sobre a pista, ou ainda, pelas condições não satisfatórias da base e sub-base da estrada, começam a surgir imperfeições ao longo do pavimento, necessitando o mesmo de manutenção. Tal intervenção causa a inconveniência na elevação do greide do pavimento, ou seja, são recapeamentos sucessivos que promovem o desnivelamento entre as faixas de rolamento e o acostamento ou meio-fio, podendo acarretar em acidentes graves, entre outros prejuízos, materiais e/ou humanos (BONFIM, 2007).

Adotou-se o serviço de fresagem asfáltica para solucionar esse problema, que consiste na retirada de camadas sucessivas de asfalto, por meio de uma fresadora asfáltica. O grande empecilho desse serviço é o resíduo oriundo da fresagem, que até então tinha pouca utilidade na engenharia rodoviária brasileira. Contudo, os órgãos ambientais estão intensificando as exigências quanto aos impactos ambientais em obras civis e aos seus resíduos (CONAMA, resolução N° 307 de 5 de julho de 2002).

É possível que esteja ocorrendo, não oficialmente, um reaproveitamento dos resíduos fresados do pavimento asfáltico em parcela pequena, na preparação de novas misturas asfálticas; no entanto, a realidade oficial é que o reuso do material ocorre não como

reciclagem, porém, como aterro em ruas periféricas, no caso da cidade de Manaus, tratando-se, portanto de uma subutilização do RFA, cujo asfalto incorporado e seus agregados não são, de fato, reciclados, na acepção do termo.

As técnicas da reciclagem de revestimentos asfálticos permitem reaproveitar esses materiais mesmo em condições deteriorada, através da fresagem e subsequente mistura a novos agregados e ligantes asfálticos e/ou agentes rejuvenescedores. Entre as principais vantagens do uso da reciclagem estão: (i) o reaproveitamento dos insumos necessários para produzir uma nova mistura asfáltica, (ii) a redução do impacto ambiental, devido à exploração de jazidas de areia, pedreiras e/ou dos leitos dos rios, no caso da região do estado do Amazonas, onde o seixo rolado é bastante utilizado na confecção do concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ), contribuindo, assim, com a diminuição dos custos de construção, no que diz respeito à aquisição de novos materiais e aos despejos inadequados desse rejeito da construção civil.

Tais benefícios levaram diversos países, como Holanda e Reino Unido, a adotarem legislações específicas e restritivas sobre o destino dos resíduos fresados das misturas asfálticas retiradas das vias públicas, incluindo os blocos de material, resultantes da abertura de valas, para a instalação de tubulações de concessionárias de serviços públicos. Ademais, neste caso, é sabido que tais materiais são diretamente encaminhados para bota-foras, em função de seu difícil reemprego, dadas suas dimensões (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Atualmente, as empresas concessionárias têm implantado sistemas de gerência de pavimento, onde um trecho é estudado e depois de conhecidas suas características, são fracionadas em pequenos segmentos, que recebem investimentos necessários à manutenção de determinada vida útil, sendo feita por meio da fresagem de uma camada do pavimento. Sabe-se que já existem, no mercado, tecnologias que reciclam 100% do material oriundo da fresagem de rodovias, o que seria a melhor solução, mas devido aos seus custos elevados,

acabam encarecendo o processo de manutenção, e, com isto, as concessionárias e os governos optam por utilizar os processos convencionais, já que os recursos e investimentos destinados às rodovias brasileiras são escassos. Nos Estados Unidos, cerca de 30% dos pavimentos asfálticos fresados são utilizados para reciclagem (Sullivan, 2009). Outro aspecto importante é a possibilidade do reaproveitamento desse material na confecção de bases e sub-bases de pavimentos, com elevados módulos de resiliência, constituindo-se em alternativa para as bases convencionais tratadas com aglomerantes hidráulicos. Os aglomerantes hidráulicos são aqueles compostos que endurecem pela contribuição da água, como por exemplo, a cal hidráulica e o cimento Portland, através de um processo de formação de silicatos hidratados de cálcio.

Na busca de soluções para minimização de deformações plásticas em pavimentos asfálticos, bem como evitar problemas relacionados à retração hidráulica dos materiais convencionais, o RFA, em tese, poderia se encaixar dentre os materiais alternativos, por trabalhar com asfaltos bastante duros, além de evidentes ganhos como matéria prima ambientalmente amigável e de baixo custo.

Uma base com adição do RFA, como estabilizante granulométrico, contribui com o incremento do seu módulo de resiliência, sendo somente possível com o emprego de um CAP muito viscoso, não sendo tal possibilidade concreta, apenas ajustando-se a matriz de agregados pétreos. Dado não ser comum a fabricação de um CAP “duro” em todas as refinarias (relacionado tal fato ao cru disponível e aos processos propriamente ditos, bem como à demanda do mercado), surge à questão: Por quê não empregar um material reciclado, onde o CAP envelhecido se apresenta como um material dúctil em um processo de larga escala, para a construção de bases de elevado módulo de resiliência, quando a situação permitir (exemplo: disponibilidade de grandes estoques de fresados)? Dados contundentes, inclusive, sobre melhor comportamento de misturas recicladas no que tange às deformações

plásticas, foram extraídos de experimentos em rodovias no estado da Flórida, a partir de meados da década de 1980 (Kandhal; Mallick, 1997).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta conceitos básicos referentes à pavimentação asfáltica. Nele será apresentada a estrutura padrão que compõe um pavimento flexível, descrevendo suas camadas e respectivas funções. Além disso, o capítulo apresenta, resumidamente, informações necessárias ao projeto dessa estrutura. Nesse contexto, será dada atenção ao dimensionamento de pavimento utilizando métodos mecanísticos.

De acordo com a NBR 7207/82 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o pavimento é uma estrutura construída após a terraplenagem e destinada economicamente e simultaneamente em seu conjunto a:

- a) resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- b) melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- c) resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento”.

Os pavimentos rodoviários são classificados, basicamente, em dois tipos: rígidos e flexíveis.

Os pavimentos rígidos possuem como camadas de revestimento placas de concreto, desta forma, podem ser designadas por “pavimento de concreto de cimento Portland”. Essa estrutura possui sua espessura fixada em função da resistência à flexão das placas. Já os pavimentos flexíveis são aqueles que possuem revestimento asfáltico. Esses podem ser chamados de pavimentos asfálticos (Bernucci *et al.*, 2006).

Os pavimentos flexíveis geralmente têm sua estrutura composta por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito, conforme (Bernucci *et al.*, 2006).

3.1 Camadas dos pavimentos flexíveis

A NBR 7207 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1982) define as camadas constituintes dos pavimentos flexíveis como:

- a) subleito é o terreno de fundação do pavimento ou do revestimento;
- b) reforço do subleito é a camada de espessura constante transversalmente e variável longitudinalmente, de acordo com o dimensionamento do pavimento, fazendo parte integrante deste e que, por circunstâncias técnicas econômicas, será executada sobre o subleito regularizado. Serve para melhorar as qualidades do subleito e regularizar a espessura da sub-base;
- c) sub-base é a camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplenagem;
- d) base é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundo dos veículos sobre a qual se constrói um revestimento;
- e) revestimento é a camada que recebe diretamente a ação do tráfego de veículos, que se destina, economicamente e simultaneamente, a melhorar as condições do rolamento quanto à comodidade e segurança a resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

A figura 1 ilustra as camadas que compõem a estrutura de um pavimento flexível, conforme a definição apresentada por Balbo (2007).

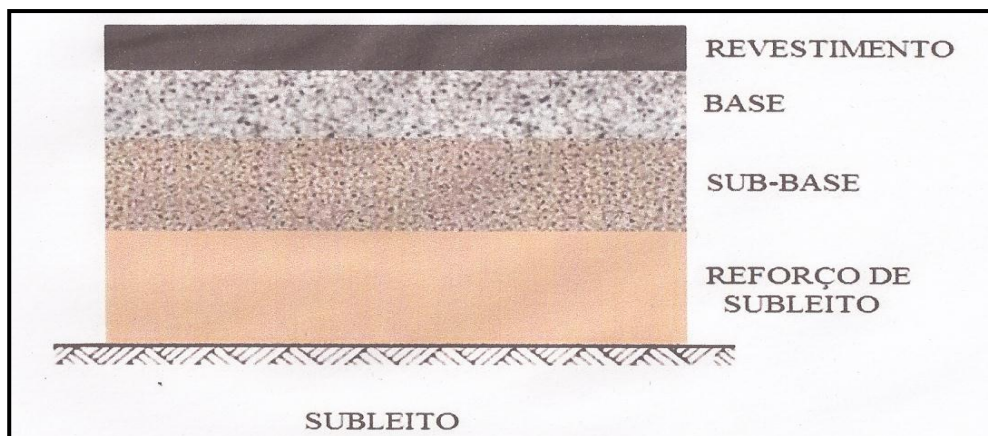


Figura 1- Camadas que compõem um pavimento flexível (Balbo, 2007).

3.1.1 Revestimento asfáltico

O revestimento asfáltico é a camada superior de pavimentos destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e também do clima. Sendo assim, deve ter a capacidade de transmitir, de forma atenuada, às camadas inferiores, as solicitações impostas ao pavimento, além de melhorar as condições de rolamento, conforto e segurança (SILVA, 2001).

O revestimento deve suportar a ação de cargas estáticas ou dinâmicas sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes ou perda de compactação. Sendo assim, essas camadas devem ser providas de materiais bem aglutinados ou dispostos de maneira a evitar movimentação horizontal (Balbo, 2007).

Dessa forma, os revestimentos asfálticos são constituídos por associação de agregados e de ligantes asfálticos.

O Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) pode ser considerado a mistura mais comum empregada nos revestimentos, no país. Os materiais empregados em sua fabricação e os processos de controle exigidos para sua execução são fatores que contribuem para sua utilização. Trata-se de uma mistura de agregados minerais (naturais ou artificiais, britados ou em forma disponível), de material fino (pó de pedra, cimento Portland, etc.) e de cimento

asfáltico de petróleo (CAP). Tem-se a homogeneização, a quente, desses materiais em uma usina misturadora.

Sendo assim, deve-se realizar a dosagem desses materiais, a fim de se obter uma composição granulométrica de agregados que, misturada ao CAP, em temperatura adequada e subsequente compactação, formem outro material. Esse material deve oferecer condições mecânicas adequadas para suportar as solicitações impostas ao pavimento (tráfego de veículos, ação do clima, etc.). Uma dosagem de mistura asfáltica visa, entre outros objetivos, a se obter uma mistura adequadamente trabalhável, não suscetível à fissuração por fadiga, com baixa deformação permanente e estável à ação de cargas estáticas ou móveis (Budny, 2012).

No dimensionamento do revestimento asfáltico, deve-se atentar às grandes deformações elásticas, as quais são geradas quando uma carga de grande magnitude solicita o pavimento.

Sendo assim, as tensões atuantes na camada asfáltica devem estar dentro dos limites suportáveis pelo concreto asfáltico que a compõe. O projeto de um revestimento asfáltico deve levar em consideração, além da resistência à tração da mistura, seu módulo de resiliência. Esse último é um dos parâmetros-chave para o dimensionamento empírico-mecânico de pavimentos flexíveis (Brito, 2006). Além disso, para que o revestimento apresente um bom comportamento ao longo de sua vida de projeto, a espessura das camadas estruturais do pavimento deve ser compatível com as solicitações impostas pelos veículos de carga.

3.1.2 Camadas de base e sub-base de pavimento

As camadas de base, sub-base e reforço de subleito devem ser dimensionadas para suportarem as solicitações que não foram absorvidas pela camada de revestimento,

protegendo, assim, o subleito das solicitações impostas à estrutura. Os materiais utilizados ao longo dessas camadas podem ser classificados basicamente em três categorias: i) granulares; ii) solos estabilizados quimicamente ou cimentados; e iii) materiais asfálticos (MOREIRA *et al.*, 2006).

A classe de materiais granulares e solos são caracterizados pela utilização de materiais como:

- a) brita graduada simples (BGS) e brita corrida;
- b) macadame hidráulico;
- c) macadame seco;
- d) misturas estabilizadas granulometricamente;
- e) solo-agregado;
- f) solo natural;
- g) solo melhorado com cimento ou cal;
- h) deve-se acrescentar o emprego de materiais decorrentes da reutilização e reciclagem, como escória de alto forno, agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil e demolições (RCD), resíduo fresado do pavimento asfáltico (RFA), etc.

Os materiais cimentados mais usados são: brita graduada tratada com cimento (BGTC); solo-cimento; cal; solo-cal-cimento; concreto compactado rolado (CCR). As misturas asfálticas mais usadas são: solo-emulsão; macadame betuminoso e base asfáltica de módulo elevado (Bernucci *et al.*, 2006).

Em geral, o revestimento asfáltico está sujeito às solicitações de compressão e de tração, devido à flexão, e as demais camadas apenas solicitações de compressão. No entanto, em certos casos, a camada subjacente ao revestimento pode ser solicitada, também, por esforços de tração. Nessas situações, recomenda-se a utilização de materiais estabilizados

quimicamente, de modo a proporcionar a coesão e aumentar sua rigidez, podendo resistir a esforços de tração (Bernucci *et al.*, 2006).

A prática empregada no dimensionamento dessas camadas tem utilizado largamente materiais granulares. Nesse sentido, deve-se estudar principalmente o módulo de resiliência e as deformações permanentes associadas ao comportamento desses materiais. Tais parâmetros são avaliados através de procedimentos laboratoriais (Malysz, 2004).

Camadas granulares têm um importante papel no comportamento global de estruturas de pavimento, especialmente quando possuem revestimento delgado ou não possuem revestimentos. O projeto de um pavimento requer o conhecimento do agregado que será utilizado na mistura. (Malysz, 2004).

3.1.3 Subleito

O terreno de fundação ou subleito vem a ser o solo natural encontrado no local de execução de uma rodovia. Sobre ele é executada a estrutura do pavimento. Sendo assim, a espessura da estrutura do pavimento dependerá das características desse material. Normalmente, quando esses materiais apresentam baixa capacidade de suporte, executa-se uma camada de reforço do subleito, que garante a integridade do terreno de fundação. Em algumas situações, quando as características técnicas do terreno natural estão aquém das necessárias para execução de uma via, deve-se realizar a substituição desse material por outro, com maior capacidade de suporte.

3.2 Projeto de pavimento flexível: breve abordagem

O projeto de um pavimento exige o conhecimento de materiais, de técnicas de projeto e de solicitações atuantes na estrutura, fatores que somados à experiência de um profissional

conduzem a projetos satisfatórios. Para a execução de um projeto de pavimentação, é necessário conhecer as características dos materiais que serão utilizados, além disso, deve-se avaliar quais serão as solicitações críticas que atuarão no pavimento (Treichel, 2009).

O primeiro critério utilizado para o dimensionamento de pavimentos foi o critério *Califórnia Bearing Ratio* (CBR) (Balbo, 2007).

O critério do CBR é atribuído ao engenheiro O. J. Porter, do *Califórnia Division of Highways* (CDH), tendo sido o primeiro método de dimensionamento de pavimentos flexíveis criado sobre bases estritamente empíricas, com considerável número de avaliações experimentais e laboratoriais. O critério básico de ruptura adotado é aquele por cisalhamento do subleito e camadas granulares, que causariam o aparecimento de sulcos nas trilhas de roda (deformações permanentes) ou mesmo rupturas plásticas do subleito.

O valor do CBR exprime uma porcentagem da resistência à penetração da brita graduada tomada por referência por Porter (1929). No Brasil, a partir desse parâmetro, desenvolveu-se o manual de projeto de pavimentos. O responsável por esse estudo foi o engenheiro Murillo Lopes de Souza, do Instituto Militar de Engenharia, do Rio de Janeiro, em meados de 1960, com última edição em 1981 (Balbo, 2007).

Sendo assim, tem-se que conhecer as solicitações que atuam no pavimento, originando deformações resilientes ou elásticas (ϵ_r) e permanentes ou plásticas (ϵ_p) (Malysz, 2004). Sabe-se que os métodos empíricos de dimensionamento de pavimentos, como é o caso do CBR, não são capazes de prever as deformações que ocorrem no pavimento, obrigando-se, portanto, à necessidade de emprego de métodos mecanísticos.

A mecânica dos pavimentos estuda os pavimentos com sistemas em camadas sujeitos às solicitações impostas pelos veículos. Assim, preocupa-se com o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos que atuam nessa estrutura (Medina e Motta, 2006).

Tem-se evoluído de métodos empíricos para processo empírico-mecanísticos, capazes de determinar solicitações impostas pelo tráfego, a partir da mecânica dos pavimentos (Brito, 2006). A figura 2 apresenta as camadas de um pavimento e as principais tensões atuantes nessa estrutura, com a redução das tensões conforme o aumento da profundidade (Franco, 2007).

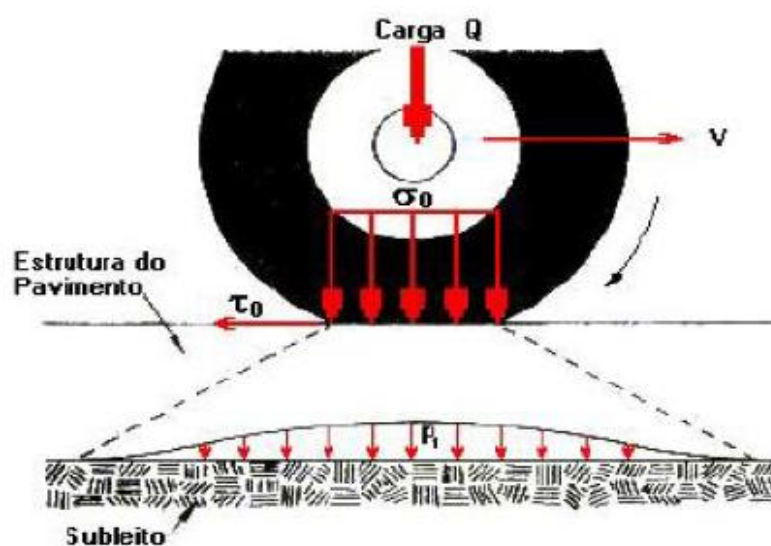


Figura 2 - Cargas no pavimento flexível (Fonte: SANTANA, 1993)

Considerando que as pressões decrescem com a profundidade, as camadas complementares da base, sub-base e o reforço deve obedecer tanto as condições, quanto a qualidade, também decrescentes. Ou seja, o material da base deve ser mais resistente que o material da sub-base, e a qualidade desta, superior à do reforço de subleito (SENÇO, 1997).

Em certos casos, uma camada subjacente ao revestimento pode ser composta por materiais estabilizados quimicamente, de modo a proporcionar coesão e aumentar sua rigidez, podendo resistir a esforços de tração. Embora possuam coesão, as camadas de solos finos apresentam baixa resistência à tração, diferentemente dos materiais estabilizados quimicamente (BUDNY, 2012).

O uso de métodos empírico- mecânicos exige parâmetros que relacionem tensões e deformações no interior do pavimento, quando esse é solicitado pelo tráfego. Nesse contexto, no dimensionamento de pavimentos flexíveis insere-se o conceito de Módulo de Resiliência (MR) dos materiais.

3.2.1 Método Mecânico

Segundo Medina (2005) e Franco (2007), a Mecânica dos Pavimentos é uma disciplina da Engenharia Civil que estuda os pavimentos como sistemas em camadas e sujeitos às cargas dos veículos, trata do cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, conhecidos os parâmetros de deformabilidade, geralmente com a utilização de programas de computação.

A utilização de métodos mecânicos de projetos de pavimentos para trabalhos de recuperação é a abordagem mais segura. Estes métodos baseiam-se em princípios de engenharia, utilizando dados de desempenho desenvolvidos através da pesquisa sobre diferentes materiais. Estruturas de pavimentos, incluindo opções de recuperação (por exemplo, reciclagem a frio ou a quente) são modeladas para obter tensões e pressões nas várias camadas, as quais estão, por sua vez, relacionadas às funções de transferência de propriedades materiais, de maneira a prever a sua capacidade estrutural. Geralmente, um nível mais alto de confiança é obtido quando comparado empiricamente aos métodos de projeto.

O projeto mecanicista utiliza um programa computacional para determinar a resposta do pavimento à carga. Tal resposta é determinada como deflexões, tensões e pressões em cada uma das camadas do pavimento. Esse método de projeto requer os dados da espessura da camada e as propriedades do material (em termos de módulo elástico e coeficiente de Poisson) das várias camadas do pavimento.

Darous (2003) salienta que a alternativa mecanística respalda-se nas seguintes constatações:

- Os procedimentos de projeto normalizados no Brasil são muito generalistas, impondo atividades às vezes pouco objetivas e/ou redundantes, que oneram desnecessariamente os projetos;
- O método de resiliência representa a primeira tentativa de considerar a análise de tensões e deformações pelo método dos elementos finitos do programa FEPAVE no dimensionamento de pavimentos flexíveis;
- Métodos empíricos trazem embutidos fatores inadequados ao tratamento dos problemas de pavimentação em regiões de clima tropical, gerando inconsistências relevantes;
- Hoje é possível construir estrutura rodoviária mais robusta, durável e econômica, utilizando-se procedimentos mecanísticos de projeto.
- Os métodos mecanísticos, ao considerarem as tensões vigentes na estrutura, são capazes de avaliar com precisão satisfatória fatores determinantes do desempenho que se constituem da tensão horizontal radial de tração na face inferior do revestimento e da tensão vertical de compressão no topo do subleito.

Franco (2007) afirma que a proposta do método mecanístico-empírico utilizado no SisPav permite utilizar diversos materiais, conhecidos, especificados, ou sobre cujo desempenho de campo ainda não se tem experiência. As vantagens encontradas nesse método se resumem em economia de recursos financeiros e ambientais, possibilitando ao projetista utilizar materiais disponíveis próximos às obras que, até então, não poderiam compor uma camada de pavimento por não se enquadrarem em alguma especificação técnica.

Segundo Franco (2007), o dimensionamento de um pavimento novo por um método mecanístico-empírico deve seguir o fluxograma apresentado na Figura 3, que deixa evidentes os dados de entrada fatores ambientais, tráfego, materiais e técnicas construtivas, o processamento por via mecanística e os critérios de decisão, que são a forma de se evitar que a degradação por qualquer um dos mecanismos de ruptura atinja valores maiores que os estabelecidos para o trecho específico, antes que o N de projeto seja alcançado.

Guimarães (2009) salienta que uma das questões críticas para uso do método mecanístico-empírico (ME) de dimensionamento de pavimento é o conhecimento exato das características de rigidez de cada um dos materiais a ser utilizado na estrutura do pavimento, especialmente o módulo de resiliência dessas camadas.

Concha (1986) enfatiza que os ensaios dinâmicos que determinam o módulo de resiliência têm sido utilizados na avaliação de materiais de pavimentação em laboratório.

Segundo Franco (2007), o módulo de resiliência é caracterizado como parâmetro necessário para o cálculo de deformações, ou seja, de deslocamentos verticais superficiais.

Convém mencionar que segundo Filho (2005), o processo de dimensionamento é interativo, uma vez que “parte-se de espessuras admitidas e calcula-se o estado de tensões e deformações, que se comparam a valores limites estabelecidos. Por realimentações sucessivas chega-se a uma estrutura satisfatória”.

Atualmente, o módulo de resiliência é um parâmetro-chave para o dimensionamento racional de pavimentos Franco (2007).

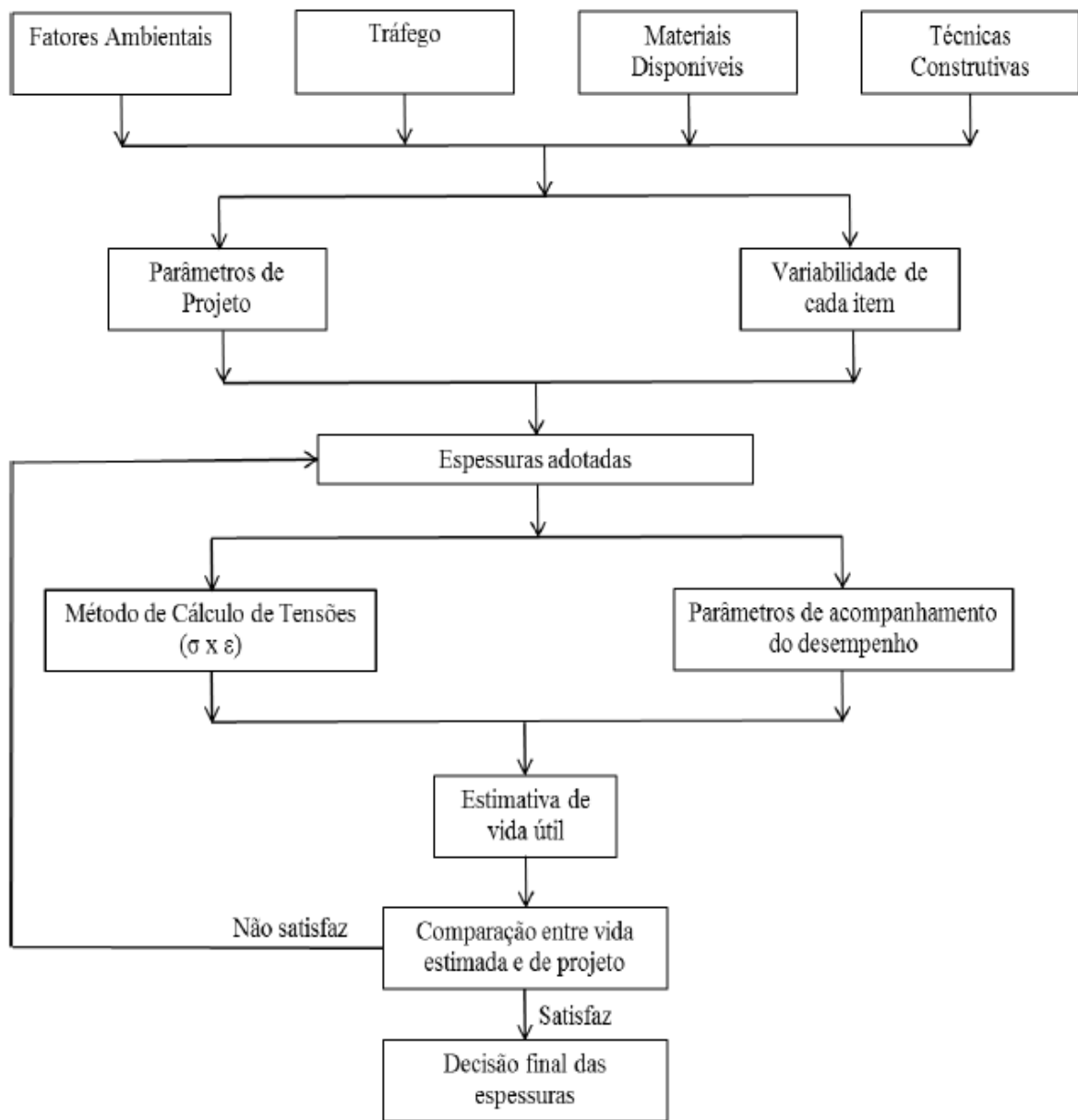


Figura 3 - Esquema de dimensionamento mecânico de um pavimento (FRANCO, 2007).

3.2.2 Módulo de Resiliência

Resiliência significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações. Esse parâmetro é definido

como a razão entre a tensão de tração e a correspondente deformação específica recuperável, quando o pavimento é solicitado por carregamentos cíclicos, de baixa duração (Medina; Motta, 2005).

Silva (2001) afirma que o comportamento estrutural de um pavimento dependerá:

- a) da espessura de cada uma das camadas que compõe;
- b) da rigidez de cada camada, dada pelo módulo de resiliência;
- c) da interação entre as camadas.

Em 1955, Francis Hveem realizou o primeiro estudo sistemático para determinar a deformabilidade de pavimentos, estabelecendo valores máximos admissíveis de deflexões para a vida de fadiga satisfatória de diferentes tipos de pavimentos. Hveem relacionou o trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos à deformação resiliente (elástica) das camadas subjacentes dos pavimentos (PREUSSLER, 1983). O módulo de resiliência para solo, obtido com o ensaio triaxial, é definido pela seguinte equação:

$$MR = \sigma_d / \varepsilon_a \quad \text{eq. (1.0)}$$

onde:

σ_d – tensão-desvio aplicada repetidamente;

ε_a – deformação elástica ou resiliente correspondente a certo número de aplicações de σ_d .

Conforme a especificação de testes descritos pela NCHRP 1-28 A – *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP, 2004), o ensaio de módulo de resiliência simula as condições em um pavimento devido à aplicação de uma carga de roda em movimento. Como resultado, o teste fornece uma excelente forma para comparar o comportamento de materiais de construção de pavimento sob uma variedade de condições e estados de tensões.

Tendo em vista o comportamento dos materiais granulares utilizados em pavimentação, Filho (2005) ressalta que, enquanto os sólidos elásticos tendem a uma relação tensão-deformação praticamente linear, nos materiais de pavimentação não tratados quimicamente ocorre uma relação não-linear, com grande dependência em relação ao estado de tensões atuante. Nessa perspectiva, foram criados vários modelos que expressam MR em função das tensões aplicadas aos materiais, especialmente a tensão-desvio (σ_d) e a tensão confinante (σ_3).

Filho (2005) salienta ainda que os modelos matemáticos para a obtenção dos valores do módulo de resiliência em função das tensões e deformações aplicadas aos corpos-de-prova de solos foram pioneiramente propostos por Hicks (1970) e Barksdale e Hicks (1973), separados em três equações, sendo uma para a utilização em solos de comportamento granular, e as outras duas para solos de comportamento coesivo como segue:

$$MR = k_1 \sigma_3^{K_2} \quad \text{eq. (1.2)}$$

$$MR = k_2 + k_3 (k_1 - \sigma_d), \text{ para } \sigma_d < k_1 \quad \text{eq. (1.3)}$$

$$MR = k_2 + k_4 (\sigma_d - k_1), \text{ para } \sigma_d > k_1 \quad \text{eq. (1.4)}$$

Considerando as observações de Filho (2005), faz-se importante mencionar que:

A Equação (1.2) é, ainda hoje, a mais utilizada para descrever o comportamento resiliente de solos arenosos, sem coesão, tendo em vista que o valor do módulo de resiliência destes materiais depende mais da tensão confinante, muito embora este modelo não seja capaz de descrever o efeito da dilatação, o qual influencia o comportamento tensão x deformação desses solos. (FILHO, 2005)

As Equações (1.3) e (1.4) referem-se ao modelo conhecido como bi-linear, já que em escala aritmética os pontos experimentais que relacionam o módulo de resiliência com tensão desvio se distribuem sobre duas retas.

Em razão das dificuldades experimentais para determinar as constantes do modelo bi-linear, Svenson (1980) propõe o modelo representado pela Equação (1.5) para o cálculo do módulo de resiliência de solos coesivos, em escala log-log, com k_2 negativo. Assim, esse novo modelo é o mais utilizado para descrição da variação de módulo de resiliência com a tensão desvio em solos coesivos:

$$MR = k_1 \sigma_d^{k_2} \quad \text{eq. (1.5)}$$

Macêdo (2004) propôs o modelo composto dado pela equação (1.6), do ponto de vista estatístico e de compreensão do comportamento dos solos e materiais de base e sub-base é mais aceitável:

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad \text{eq. (1.6)}$$

Segundo Macêdo (2004), para os solos cimentados naturalmente pela laterização ou artificialmente pela estabilização com cimento, o módulo de resiliência pode ser representado por um valor constante, elástico linear: $MR = E$.

Os módulos de resiliência dependem da densidade e da umidade dos solos – os fatores de estado o modo como se arrumam e aglomeram as partículas do solo, assim como a quantidade de água de compactação e de equilíbrio são determinantes na deformabilidade. (Medina e Motta, 2005).

3.3 Programas de Análises de Tensões

Em relação à análise dos pavimentos, Darous (2003) enfatiza que o módulo de resiliência é um dos fatores que interferem no desenvolvimento de método analítico para avaliação do desempenho de pavimentos. Desse modo, faz-se necessário conhecer além das

espessuras, os módulos de resiliências das camadas componentes do pavimento e as características da carga aplicada.

A partir da década de 1970, foram desenvolvidos muitos sistemas de cálculo de tensões e deformações para pavimentos asfálticos e de concreto. Nesse sentido, entre os programas para cálculo de tensões e deformações em sistemas de camadas elásticas, destacam-se, segundo Darous (2003), os seguintes:

- Bistrot e Bisar –Shell;
- Elsym 5 – Chevron;
- Alize III – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées;
- Kenlayer – Universidade de Kentucky;
- JULEA – Uzan (1978);
- FEPAVE – Berkeley (1968), utilizado pela COPPE/UFRJ desde 1973;
- MECAF 3D – Régis Martins Rodrigues – origem Booker e Small;
- PAVE – Franco (2000);
- ILLI – PAVE – Universidade de Illinois;
- SENOL – Universidade de Nottingham – Inglaterra;
- CRACKTIP – Universidade de Ohio – EUA.

Patriota (2004) destaca a finalidade dos programas disponíveis atualmente:

Os vários programas disponíveis permitem a análise do comportamento quanto à linearidade ou não linearidade dos materiais betuminosos, granulares e coesivos que compõem as camadas do pavimento, na obtenção das tensões e deformações no subleito e nas diferentes camadas do pavimento. (PATRIOTA, 2004)

Darous (2003) explica que os programas computacionais respaldados em métodos de cálculos mais conhecidos e utilizados no Brasil eram, até aquela data, o ELSYM5 (*Elastic Layered System*) que utiliza modelagem elástico linear e procedimento de cálculo do método das diferenças finitas, e o FEPAVE2 (*Finite Element Analysis of Pavement Structures*), que

considera a modelagem elástico não linear, e usa o método dos elementos finitos como procedimento de cálculo.

O ELSYM5 é um programa desenvolvido pela Universidade de Berkeley que calcula as tensões, deformações e deslocamentos para um sistema tridimensional de camadas elásticas. O carregamento pode ser uma ou mais cargas aplicadas uniformemente sobre uma área circular na superfície do sistema. Cada camada é de espessura uniforme e estende-se horizontalmente. As interfaces entre as camadas são consideradas aderidas, com exceção da interface entre o fundo da camada e a base rígida, que pode ser considerada sem ou com aderência. O programa pode analisar o sistema de camadas assente sobre uma base rígida de espessura finita ou assente sobre um espaço semi-espaço elástico, segundo Silva (2001).

Darous (2003) enfatiza que esse programa utiliza a técnica de diferenças finitas, permite dez tipos de carregamentos, cinco subcamadas e considera atrito variável entre as camadas e módulo de resiliência estático linear. A figura 4 mostra os modelos de sistema de coordenadas utilizado pelo programa.

Os dados de entrada do ELSYM5 são:

- Com relação às cargas: quantidade, valor, coordenadas (x, y) e pressão dos pneus;
- Com relação às camadas e seus materiais constituintes: quantidade, espessuras, coeficientes de Poisson e Módulos de Elasticidade;
- Com relação aos pontos de análise: coordenadas (x, y) e profundidade z.

Os dados de saída do programa se constituem, para cada ponto solicitado de análise, nos seguintes elementos ocorrentes para o carregamento considerado:

- Tensões normais;

- Tensões cisalhantes;
- Tensões principais atuantes;
- Deslocamentos normais;
- Deformações normais;
- Deformações cisalhantes;
- Deformações principais.

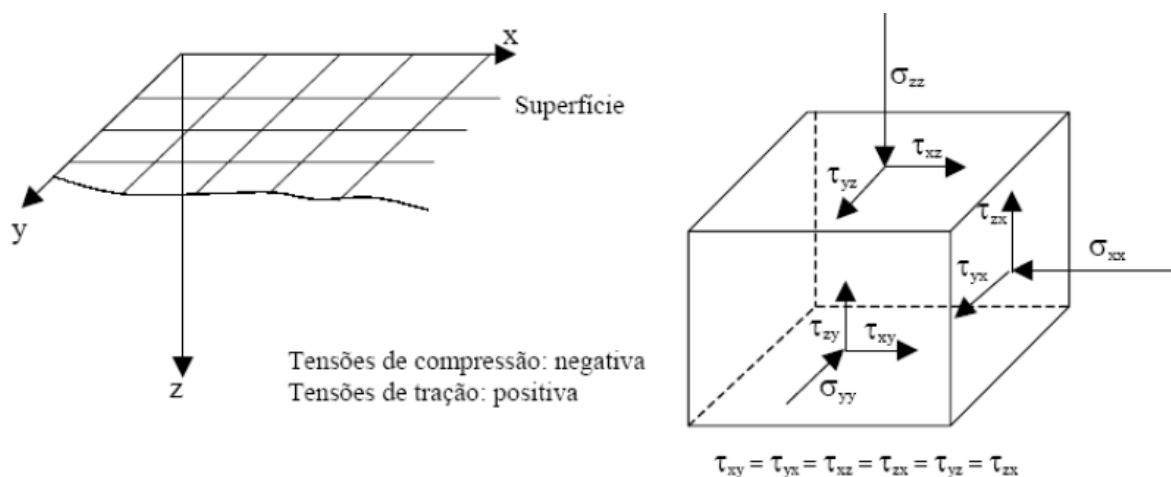


Figura 4 - Modelos de sistema de coordenadas utilizado pelo programa ELSYM5 (Silva, 2001)

Darous (2003) salienta que o FEPAVE é um programa desenvolvido pela Universidade de Berkeley, em 1965, por E. L. Wilson. Foi modificado em 1966 por J. M. Duncan, C. L. Monismith e E. L. Wilson, para gerar automaticamente configurações de elementos finitos, adequadas para a análise de estruturas axissimétricas de pavimentos flexíveis e para adaptar tipos de módulos dependentes das tensões através de uma análise não-linear.

De acordo com Darous (2003), o programa computacional FEPAVE permite a avaliação de estruturas de pavimento com camadas múltiplas, segundo a formulação matemática advinda da teoria da elasticidade, direcionada para pavimentos de meios semi-

infinitos e estratificados de até 12 camadas. Utiliza modelagem elástico-não linear (Módulo de Resiliência variável) e o procedimento de cálculo é o do método dos elementos finitos (meio contínuo dividido em elementos fictícios de dimensões finitas, ligados entre si por pontos nodais que se assimilam a articulações sem atrito). (DAROUS, 2003)

Os dados de entrada do programa FEPAVE são:

- A pressão média proveniente da roda do veículo e o raio de carregamento;
- Propriedades dos materiais (módulo resiliente e coeficiente de Poisson);
- Para análise não-linear pode-se utilizar como tensões incrementais iniciais as tensões gravitacionais, neste caso, é necessário fornecer as massas específicas dos materiais e o coeficiente de empuxo no repouso é assumido como igual a um;
- A malha de elementos finitos e restrições de fronteira e carregamento.

Os dados de saída consistem de:

- Deslocamentos radiais e axiais de cada nó; e
- As tensões radial vertical (σ_r); tangencial (σ_z); cisalhante, ($\tau_{rz} = \tau_{zr}$); principal maior (σ_1); principal menor (σ_3); octaédrica normal (σ_{oct}); octaédrica cisalhante (τ_{oct}).

Um dos pontos críticos verificados nessa técnica foi a definição dos valores mínimos de módulos. Os modelos não lineares estimam o valor dos módulos de resiliência dentro de um intervalo limitado de níveis de tensão, que, em geral, são os mesmos utilizados em laboratório. Isso evita valores de módulos muito elevados para pequenos níveis de tensões. Em geral, a limitação ocorre com maior frequência nos pontos distantes da aplicação da carga, nas camadas inferiores e no subleito, ou seja, onde os níveis das tensões atuantes são mais baixos. A definição desse limite é uma questão chave, pois pode alterar significativamente os

resultados obtidos nas análises elásticas não lineares, dependendo da sensibilidade do modelo de comportamento dos materiais. (DAROUS, 2003).

Aedo (1997) adotou os valores mínimos para $\sigma_3^{\min} = 0,010$ MPa e para $\sigma_d^{\min} = 0,020$ MPa implicitamente em seu programa RIOPAVE, como já havia sido feito no FEPAVE por Silva (1995). O valor mínimo atribuído para a tensão de confinamento ($\sigma_3^{\min}$) pelos citados autores é muito inferior à tensão aplicada no ensaio, que é de 0,021MPa. Essa consideração gera, por exemplo, valores muito baixos de módulos de resiliência, para materiais com comportamento granular ($MR = f(\sigma^3)$), em níveis de tensão de confinamento próximos ao mínimo.

De acordo com Franco (2007) o programa computacional de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav, foi desenvolvido para realizar análises e dimensionamentos de estruturas de pavimentos, segundo os conceitos relativos ao estado da arte da mecânica dos pavimentos. Um dos critérios definidos foi o de criar uma interface de fácil utilização, com entrada de dados simplificada e com valores sugeridos para fins de anteprojeto.

O SisPav utiliza a teoria da elasticidade, por meio do programa AEMC, cuja base foi a rotina JULEA desenvolvida por UZAN (1978). A abordagem da análise elástica não linear é realizada de forma simplificada, com a divisão das camadas com este comportamento em três subcamadas, e de modo semelhante ao detalhado na descrição do AEMC.

Duas opções de análise são possíveis de serem realizadas. A primeira delas é o dimensionamento da estrutura propriamente dito, em que o programa analisa os dados de entrada e, por meio um algoritmo similar ao de busca binária em tabela ordenada, encontra a espessura da camada que atenda aos requisitos de projeto. A segunda análise só realiza uma verificação dos dados e requisitos definidos pelo projetista e informa a vida de projeto que a estrutura pode suportar.

Nas duas análises, o programa verifica os danos acumulados por fadiga no revestimento asfáltico ou, se for o caso, na base das camadas cimentadas. Opcionalmente, o projetista pode solicitar as estimativas de afundamento de trilha de roda e dos danos relativos à deflexão máxima na superfície do pavimento e à tensão limite no topo do subleito.

3.3.1 Definição de estratégias de manutenção

Balbo (1997) descreve que um sistema de gerenciamento de pavimentos fornece subsídios para a tomada de decisão de técnicas de recuperação a serem executadas, de acordo com o grau de deterioração e fatores econômicos. O quadro 1 apresenta os tipos de intervenção de recuperação do pavimento.

Quadro 1- Tipos de intervenção de recuperação do pavimento (BALBO, 1997).

TIPOS DE INTERVENÇÃO	DEFINIÇÃO
Manutenção de Rotina	Reparos localizados em pavimentos; limpeza, remoção de detritos, terra ou neve.
Manutenção Periódica	Atividades relacionadas ao melhoramento de condições superficiais com vista à preservação da integridade estrutural e da qualidade de rolamento (com uso de reforços esbeltos em concreto asfáltico, tratamento superficial, lama asfáltica ou ainda banhos selantes).
Reabilitação	Reparos seletivos, reforços estruturais ou aplicação de camadas de regularização com a finalidade de restaurar a capacidade estrutural do pavimento ou a qualidade de rolamento.
Reconstrução	Renovação da estrutura do pavimento com remoção da estrutura danificada, como resultado da negligência prolongada, que resulta na impossibilidade de reabilitar o pavimento.
Restauração	Quando, para um mesmo projeto, serviços de reabilitação e de reconstrução são contemplados simultaneamente.
Melhoramento	Quando, além de atividades relacionadas às anteriores são presentes, o projeto contempla também serviços de duplicação, melhoria de traçado, ampliação, etc, exigindo a construção de novos pavimentos.

O Sistema de gerenciamento de pavimentos permite definir as prioridades das intervenções por meio de análise sistêmica de todo o complexo viário de vias pavimentadas.

A hierarquização é realizada de forma programática e as intervenções devem ser programadas para curto, médio e longo prazo.

Nascimento (2008) menciona que a utilização do sistema de gestão dos pavimentos para o gerenciamento da manutenção da malha viária possibilita ao administrador realizar diagnósticos realistas e aplicar os recursos de maneira mais eficaz, estabelecendo prioridades a curto, médio e longo prazo, avaliando o desempenho de cada alternativa e técnicas de recuperação distintas, fornecendo argumentos fundamentados ao Poder Executivo e justificando os recursos orçamentários necessários para a manutenção do sistema viário.

3.3.2 Reciclagem de pavimentos e o emprego da fresagem

De acordo com Fonseca (2002), a reciclagem de pavimentos é uma técnica cujo objetivo fundamental é transformar um pavimento degradado numa estrutura homogênea e adaptado ao tráfego que deverá suportar. Consiste em reutilizar o pavimento desgastado na construção de uma nova camada, mediante a desagregação do mesmo numa certa profundidade, podendo ser incorporado à mistura vários aglomerantes (cimento ou emulsão), a água para a hidratação e compactação, algum aditivo e, eventualmente, agregados para correção granulométrica e/ou aumento da resistência. A mistura homogênea destes materiais espalha-se, compacta-se e deixa-se curar adequadamente, constituindo uma base ou uma camada estruturalmente resistente de um novo pavimento.

A técnica de reciclagem iniciou-se nos Estados Unidos, em 1915. No entanto, a partir de 1930, a operação perdeu força, devido ao aumento da oferta de petróleo. Em 1970, com a falta de materiais asfálticos e com a crise econômica internacional, voltou-se novamente a atenção ao reaproveitamento de materiais presentes em pavimentos deteriorados. No Brasil a

técnica foi empregada pela primeira vez em 1960, pela prefeitura municipal do Rio de Janeiro, em ruas daquela cidade (David, 2006).

Segundo Fonseca (2002), a reciclagem de um pavimento tem como objetivos: melhorar as características e comportamento do pavimento às solicitações do tráfego de veículos; transformar um pavimento degradado e heterogêneo numa estrutura resistente e mais homogênea; aumentar a capacidade de suporte do pavimento, adaptando-a às solicitações do tráfego; aumentar a durabilidade do pavimento; reduzir a susceptibilidade do pavimento à água; aumentar a resistência do pavimento à erosão; e proteger o leito do pavimento e das camadas inferiores, cujas características são muitas vezes deficientes.

Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do (DNIT/06), a reciclagem dos pavimentos apresenta-se como uma solução para muitos problemas e oferece inúmeras vantagens em relação à utilização convencional de materiais virgens, como a conservação de agregados, ligantes e de energia, a preservação do meio ambiente e a restauração das condições geométricas existentes da pista de rolamento.

Quando a avaliação estrutural de um pavimento indicar que a estrutura existente não está adequada ao tráfego atual e futuro, a primeira solução a ser levada em conta é o recapeamento. Porém, se o revestimento e as camadas subjacentes não estiverem adequadas para suportar uma camada asfáltica, o recapeamento deve ser descartado e a reciclagem deve ser avaliada como uma possível solução (BERNUCCI *et al.*, 2007).

A reciclagem de pavimentos é uma técnica de reabilitação onde toda ou parte da camada do pavimento existente são reaproveitadas na construção de uma nova camada, incorporando ou não novos materiais, permitindo assim obter um pavimento com características semelhantes ou superiores ao pavimento antigo (FONSECA, 2009).

Segundo Bernucci *et al* (2007), existem numerosas vantagens técnicas em se utilizar a fresagem e a reciclagem nos processos de recuperação de pavimentos degradados, além da

questão ecológica de preservação de recursos minerais escassos. É importante destacar que a fresagem permite a reabilitação de pavimentos sem mudar sua altura, substituindo camadas ao invés de sobrepor-las.

3.3.3 Fresagem: conceitos básicos

A origem do termo fresagem remonta à técnica de desbaste ou corte de metais, ou outras peças, por intermédio de uma engrenagem motora constituída de um cortador giratório de ângulo diverso, ou de várias fresas, em movimento giratório contínuo (Bonfim, 2007).

O DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – em seu Glossário de termos técnicos rodoviários (BRASIL, 1997), define a fresagem de pavimentos como o “Desbastamento a quente ou a frio de superfícies asfálticas, como parte de um processo de reciclagem de pavimento asfáltico”. Bonfim (2007) conceitua a fresagem de pavimentos como o corte ou desbastes de uma ou mais camadas do pavimento, com espessura pré-determinada, por meio de processo mecânico realizado a quente ou a frio, empregado como intervenção, visando à restauração de pavimentos.

Na década de 1970, quando se iniciou o processo de reciclagem de pavimentos, o material era extraído da pista por meio de escarificação do pavimento; esse processo resultava em materiais que, devido às suas grandes dimensões, necessitava ser britados para posterior reutilização. Dessa forma, considerou-se a técnica inadequada. A máquina para fresar foi desenvolvida a partir da segunda metade da década de 1970. O equipamento foi considerado útil na realização do desbaste do pavimento em profundidade pré-determinadas, o que antes não era possível (Bonfim, 2007).

No Brasil, a técnica teve início no ano de 1980, com o emprego de uma fresadora americana nas obras de restauração da via Anchieta para a DERSA – Desenvolvimento Rodoviário S.A do estado de São Paulo. Dessa forma, esse serviço pode ser considerado

recente, no que diz respeito ao seu emprego e ao conhecimento adquirido em torno do tema, o que garante a motivação da questão de pesquisa desse trabalho. A figura 5 mostra o procedimento de fresagem, notando-se que o equipamento possui uma esteira rolante, por onde o material fresado é transportado até um caminhão basculante, sendo executado em via urbana de Manaus pela secretaria municipal de infraestrutura da prefeitura municipal de Manaus (SEMINF/PMM).



Figura 5 - Procedimento de fresagem de pavimento no conjunto Manauense em Manaus/AM.
Fonte: SEMINF/PMM.

De acordo com o DNIT - Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, (2006), a reutilização dos agregados do pavimento degradado para os serviços de reconstrução, restauração e conservação propiciam uma diminuição da demanda de novos materiais e das respectivas distâncias de transporte, prolongando o tempo de exploração das ocorrências existentes. Isso é particularmente benéfico devido às restrições impostas pela legislação de proteção ao meio ambiente e pela crescente valorização dos sítios de ocorrências de jazidas.

A Associação de Reciclagem Asfáltica dos Estados Unidos (*The Asphalt Recycling and Reclaiming Association - ARRA*) define os tipos de reciclagem em cinco categorias distintas, de acordo com o tipo de execução, conforme a figura 6.

- Reciclagem a frio (*Cold planning*);
- Reciclagem a frio in-situ (*Cold in-place recycling*);
- Reciclagem a quente (*Hot recycling*);
- Reciclagem a quente “in situ” (*Hot in-place recycling*);
- Reciclagem de camadas do pavimento - FDR (*Full depth reclamation*).

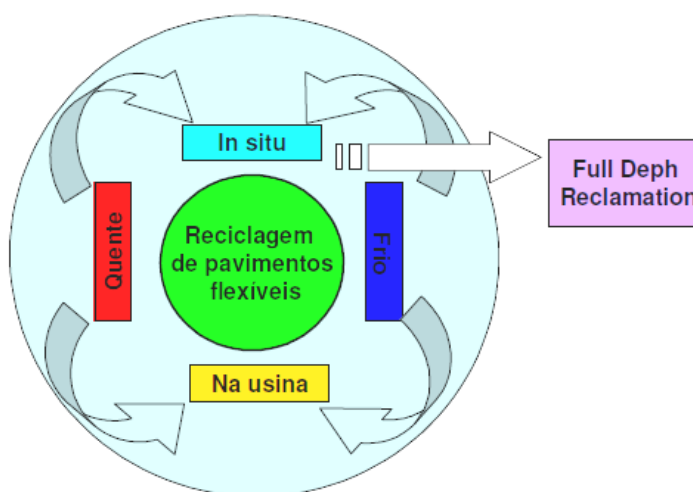


Figura 6 - Tipos de reciclagem de pavimentos flexíveis.
Fonte: ARRA.

3.3.3.1 Reciclagem a frio na usina

A técnica de reciclagem a frio de revestimentos asfálticos em usina é uma alternativa de recuperação de pavimentos aplicada há mais de 25 anos, com incremento frente a crescente preocupação com o destino dado aos resíduos sólidos produzidos pelas aglomerações urbanas, assim como o possível esgotamento das reservas naturais não renováveis, (DAU, 2001). Esse é um método que permite a reconstrução de pavimentos flexíveis que apresentam falhas ou estejam em estado de degradação. Essas falhas podem ser: trincas transversais, panelas, trilhas de roda, irregularidades na superfície ou a combinação de todos esses defeitos. O processo também possibilita que a camada seja removida a uma profundidade desejada, utilizando para

isso a técnica da fresagem, permitindo que a restauração do pavimento seja feita através de uma nova camada de revestimento, e também que se façam correções no greide da pista, inclinações, ondulações e deformações na camada de revestimento. A reciclagem a frio utiliza máquinas autopropelidas para fresar as camadas do pavimento, dotadas de um cortador giratório que corta o pavimento a uma espessura predeterminada, como salienta o ASPHALT INSTITUTE (2010).

De acordo com o manual da Wirtgen (2004), o método de reciclagem a frio compreende dois processos: na usina ou *in situ*. Na usina, o material recuperado da rodovia existente é transportado até um depósito central, onde o mesmo é alimentado através de uma unidade de processamento, ou *in situ*, utilizando uma máquina de reciclagem. O processamento na planta geralmente é a opção mais cara em termos de custo por metro cúbico do material processado, principalmente devido aos custos de transporte que não existem na reciclagem *in situ*. Porém, ambos os métodos de reciclagem, tem seu espaço no mercado da construção e a decisão sobre qual deve ser utilizado é dada pelo:

1. Tipo de construção. O processamento na planta geralmente é considerado quando o material reciclado é utilizado na construção de uma nova camada de pavimento, como aumentar a capacidade estrutural do pavimento existente.

2. Material local de um pavimento que deve ser reciclado. Quando se recicla a camada superior do pavimento, deve-se fazer uma seleção ou pré-tratamento do material, devido à variedade e a condição do material reciclado.

A reciclagem na usina é indicada quando o processo inclui uma mistura de materiais reciclados e virgens, os quais necessitam de algum tipo de tratamento.

A mistura final poderá ser utilizada como camada de base, porém, esta camada deverá ser revestida com um tratamento superficial ou uma mistura asfáltica antes de ser submetida à ação direta do tráfego (DNIT, 2006).

A reciclagem a frio *in-situ* reabilita o revestimento existente, utilizando normalmente asfalto emulsionado, sem ser aquecido, para produzir uma nova camada asfáltica com características semelhantes a uma mistura de pré-misturada a frio (PMF). O processo consiste basicamente da extração de uma determinada profundidade do revestimento, adicionando-se emulsão asfáltica, aditivos, espalhando-a e compactando em seguida através de equipamentos apropriados. A espessura máxima alcançada com este tipo de reciclagem varia normalmente entre 75 mm a 100 mm.

Segundo David (2006), o processo de reciclagem *in situ* é composto essencialmente por três operações:

- A exploração dos materiais granulares: representa a fresagem até uma profundidade determinada, para recuperar o material granular do pavimento existente, a ser reutilizado na construção da nova camada;
- A mistura dos materiais: representa a mistura, a frio, do material desagregado no próprio local, onde podem ser adicionados a água (hidratação ou pré-molhagem), os ligantes (emulsão betuminosa, espuma de betume, cimento ou cal) e os agregados para eventual correção da distribuição dos tamanhos das partículas; e
- A compactação da mistura: refere-se ao adensamento do material por compactação e o nivelamento para obtenção de uma nova camada do pavimento.

Existem diversos melhoramentos recentes dos equipamentos utilizados para o serviço de reciclagem a frio *in-situ*. As fresadoras modificadas ou especialmente projetadas estão disponíveis para processar o material removido numa única passada (DNIT, 2006).

O primeiro projeto de reciclagem foi desenvolvido na Malásia, em 1985. Em dezembro de 1988, o segundo trabalho com reciclagem a frio *in situ* foi dirigido pela “Federal Trunk Road” entre Pagar Sasak e Merapoh, no estado de Pahang, envolvendo 55 km de extensão. O projeto levou quase dois anos para ser terminado, mas, passados 12 anos de sua conclusão o pavimento ainda apresentava um excelente desempenho (SUFIAN, 2005).

Wirtgen (2004) destaca que esta técnica elimina a necessidade de aquecimento da mistura e diminui significativamente o custo com o transporte de material, uma vez que somente o agente reciclador será transportado. Geralmente, a emulsão asfáltica é adicionada como um agente reciclador. A emulsão é proporcional ao peso do material fresado. Cinzas, cimento ou cal virgem também pode ser adicionado. Estes aditivos são eficazes para revestimentos asfálticos e misturas de baixa estabilidade.

A figura 7 apresenta o processo de reciclagem a frio *in-situ*, como pode ser observado, inclui o corte até o greide desejado, a fragmentação do antigo pavimento, e possibilita a adição e mistura de aditivos.

A peça principal de uma máquina de reciclagem é o rotor fresador e misturador, equipado com uma grande quantidade de ferramentas de corte. O tambor normalmente gira para cima, pulverizando o material no pavimento da rodovia existente, conforme ilustrado (WIRTGEN, 2004).

Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do (DNIT/06), a reciclagem dos pavimentos apresenta-se como uma solução para muitos problemas e oferece inúmeras vantagens em relação a utilização convencional de materiais virgens, como a conservação de agregados, ligantes e de energia, a preservação do meio ambiente e a restauração das condições geométricas existentes do pista de rolamento.

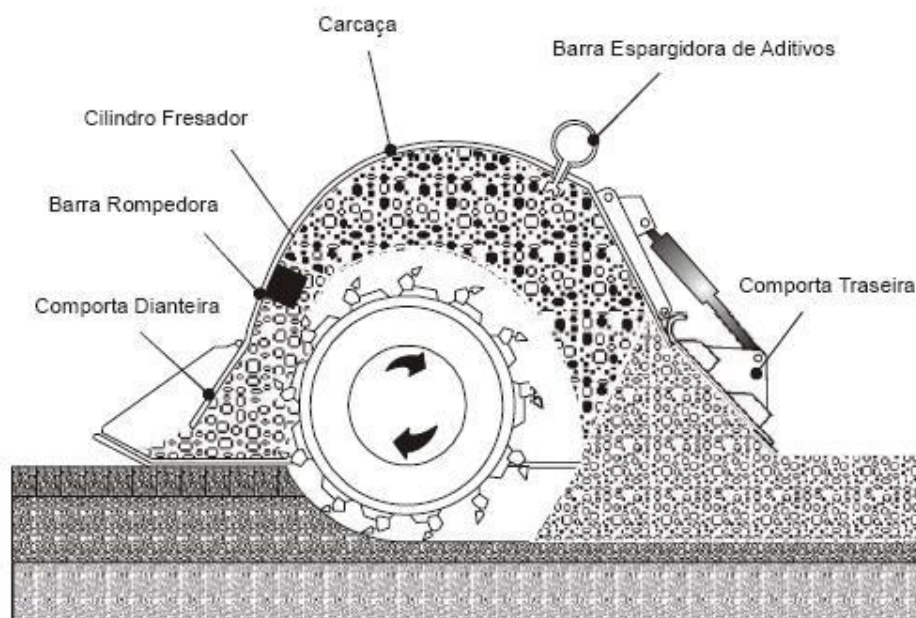


Figura 7- Dispositivo de reciclagem *in situ* (Fonte: DNIT, 2006).

3.3.3.2 Reciclagem a quente

A reciclagem a quente de pavimentos é um processo em que parte ou toda a estrutura do pavimento é removida e reduzida a dimensões apropriadas, para depois ser misturada a quente no próprio local *in-situ* ou em usina estacionária. O processo pode incluir a adição de novos agregados, cimento asfáltico e agente rejuvenescedor. O produto final deve atender às especificações de misturas asfálticas a quente, destinadas às camadas de base, de ligação ou de rolamento (DNIT, 2006).

3.3.3.3 Reciclagem a quente *in situ*

Segundo o DNIT (2006), esse tipo de reciclagem é definido como um processo para correção de defeitos de superfície com o corte e fragmentação do antigo revestimento asfáltico, a mistura com agente rejuvenescedor, agregado virgem, material ou mistura asfáltica, e a posterior distribuição da mistura reciclada sobre o pavimento, sem a remoção do

material reciclado do local de origem. A reciclagem pode ser realizada tanto como uma operação de passagem única, que associa a mistura reciclada com o material virgem, quanto como uma operação de passagem dupla, onde a mistura reciclada é recompactada, seguida da aplicação de uma nova camada de mistura asfáltica. A figura 8 apresenta a sequência de operação deste tipo de reciclagem.



Figura 8 - Esquema da operação da reciclagem a quente *in situ* com fresagem a quente.
Fonte (PINTO 2002).

3.3.3.4 “Full deph reclamation” - FDR

O Guia da FHWA – “Federal Highway Administration” (1997) define a FDR (reaproveitamento em toda a espessura) como um método de reciclagem, onde toda a seção do pavimento asfáltico e uma quantidade predeterminada de material das camadas subjacentes podem ser tratadas para produzir uma base estabilizada.

Nessa mistura, diferentes tipos de aditivos podem ser incorporados para haver uma melhora estrutural da base, tais como: emulsões asfálticas e agentes químicos como a cal hidratada, cimento portland e cinza volante.

O sistema incorpora as camadas do pavimento com a camada asfáltica do revestimento, com ou sem a adição de novos materiais, produzindo uma nova camada de base estabilizada para pavimentos em estado de deterioração. Esse método tem como vantagem a

possibilidade de se corrigir defeitos estruturais no pavimento, especialmente nas camadas abaixo do revestimento.

Os cinco passos principais do processo são: pulverização, introdução do aditivo, produção da mistura, compactação e aplicação de um revestimento. Se o material *in situ* não for o suficiente para se estabilizar a espessura de base desejada, novos materiais podem ser adicionados no processo. Este método de reciclagem é geralmente executado com espessuras que variam de 100mm a 300 mm.

Existem diferentes tipos de FDR estudados pela *Federation of Canadian Municipalities* - FCM (2005), os quais incluem mistura pulverizada (“pulvi-mixing”) ou reprocessamento *in-situ* (sem estabilização); FDR com estabilização betuminosa (usando emulsão asfáltica ou espuma de asfalto); FDR com estabilização química (cimento Portland, cinza volante, cal ou aditivos como cloreto de cálcio ou cloreto de magnésio); e FDR com estabilização mecânica (correção da granulometria).

Desde alguns anos é utilizada no país a técnica de reciclagem envolvendo a adição de espuma de asfalto ao material fresado de pavimentos. A formação da espuma ocorre quando pequenas quantidades de água são adicionadas ao asfalto quente, com consequente aumento de área superficial e redução de viscosidade. Nesta forma, o asfalto tem facilitado sua mistura com agregado frio úmido. Dama (2001) descreveu a utilização da reciclagem com espuma de asfalto em um trecho da BR-290, no trecho Porto Alegre-Eldorado do Sul. Foi realizada retroanálise da condição do pavimento existente e a elaboração do projeto de restauração por reciclagem com espuma de asfalto, que compreendeu a reciclagem de 16 cm de camada asfáltica existente e execução de 5 cm de concreto asfáltico. O trecho considerado era constituído por quatro faixas de tráfego, sendo duas na pista denominada Norte (sentido Porto Alegre – Eldorado do Sul) e duas na pista denominada Sul (sentido Eldorado do Sul – Porto Alegre). A solução adotada para a restauração da pista Sul foi à reciclagem com espuma de

asfalto e foi executada nos meses de fevereiro e março do ano de 2001. Desde então, o trecho vem sendo avaliado periodicamente através da realização de ensaios defletoométricos e de investigações da presença de defeitos de superfície. O propósito de tais avaliações é a obtenção de uma melhor compreensão do comportamento estrutural da camada reciclada com espuma de asfalto.

A primeira vantagem de estabilizar com espuma de asfalto é que a base compactada pode receber o revestimento em menos de 48 horas, quando comparado com as duas a seis semanas requeridas pela reciclagem a frio *in situ*. Isto se apresenta como um grande benefício, para os projetos que precisam ser finalizados em pouco tempo, pois a camada de base não precisa ficar um longo período sem a camada de revestimento, além de garantir que não ocorra o efeito de reflexão de trincas (FCM, 2005).

Uma pesquisa, realizada no Canadá pela Universidade Laval, restaurou uma seção de pavimento na cidade de Québec, onde utilizou a pulverização e a mistura do concreto asfáltico existente com o material de base e sub-base, atingindo uma espessura de 500 mm, (TIGHE, 2001, citado por FCM, 2005). O cimento Portland foi adicionado para pulverizar a mistura *in situ* (foram utilizados 9%, 12% e 15% de cimento em relação à massa seca do material), e então se fez a compactação de forma convencional. Essa tentativa resultou em uma base de concreto compactada. Pavimentos que apresentem trincas em blocos, nos bordos, longitudinais ou transversais e por escorregamento, baixa capacidade estrutural e deformações permanentes (corrugação, trilha de roda, escorregamento de massa) apresentam características ideais para serem restaurados através da reciclagem profunda.

Um estudo realizado por Du e Cross (1998), no estado do Kansas, mostrou que a cinza volante tem desempenhado bons resultados e está sendo utilizada como aditivo em misturas recicladas a frio *in situ*. Os usos de emulsão asfáltica com pasta de cal quente, também foram

estudados em laboratório como uma alternativa para o aumento da resistência à tração apresentando resultados positivos.

A caracterização dos materiais, um qualificado projeto da mistura e ensaios de laboratório faz parte do controle de qualidade e devem ser verificados durante os trabalhos de restauração do pavimento. Esses são componentes fundamentais para o sucesso de um projeto de restauração profunda (FDR), conforme descrito por FCM (2005).

Uma revisão de estudos de caso publicados de FDR, feita pela FHWA (1997), mostra que quando executado corretamente, a FDR pode reconstruir pavimentos de forma eficaz, eliminando vários defeitos. Este método prevê uma alternativa muito econômica em relação aos métodos convencionais. O estudo revisou alguns casos como o da recuperação da estrada *Mt. Wachusett Road, Princeton, MA*, em 1991, o qual correspondia a um pavimento com seção de 9,7 m de largura, com uma espessura de mistura asfáltica a quente de 75 mm sobreposta a uma camada de 150 mm de macadame. Embora não houvesse nenhuma indicação de ruptura da base, a superfície apresentava panelas (buracos) expressivas. Isso condicionou ao uso da FDR com a aplicação de cloreto de cálcio líquido, para aumentar a resistência do material ao congelamento. O processo iniciou com o corte da camada de revestimento juntamente com parte da camada de base, num total de 150 mm de profundidade. Logo após, foi aplicado uma porcentagem de 35% da solução de cloreto de cálcio, para pulverizar o material, equivalendo a uma taxa de 3,6 l/m². A base foi restaurada para ser capaz de aceitar o tráfego antes da colocação da camada de revestimento asfáltico. Ao longo do processo de restauração, o tráfego no pavimento era permitido e não houve necessidade alguma de se criar desvios ou aplicar qualquer tipo de camada selante na base restaurada.

Outro caso revisado pela FHWA (1997) foi o de restauração de uma rodovia feita pelo Texas DOT, em 1995, usando o processo FDR. O projeto consistia no processamento de 180

mm da camada de revestimento (HMA) e 76 mm da base de material granular existente. O material existente foi fresado, pulverizado, peneirado e tratado com cimento e água para produzir uma base tratada com cimento (BTC) de baixa resistência. A base tratada foi executada usando-se dois trens de reciclagem como mostra a figura 9. O processo era finalizado colocando-se a camada de mistura asfáltica a quente sobre a base tratada.



Figura 9 - Trem de reciclagem usado na FDR.

Fonte: FHWA (1997).

O trem de reciclagem consiste de um conjunto de equipamentos, cada um com uma operação particular. Os equipamentos comumente usados são a recicladora a frio, britador portátil e misturador móvel, como ilustrados na Figura 10.

Outro item importante no processo da reciclagem do tipo FDR são os agentes recicladores. Eles servem para melhorar as propriedades mecânicas dos materiais de pavimentação. Emulsões asfálticas (de ruptura lenta ou média), resíduos de petróleo, e versões emulsificadas de agentes recicladores comerciais podem ser usados. Água também pode ser adicionada para ajudar na dispersão do asfalto modificado durante a operação de mistura.

Uma pequena porcentagem de cimento Portland pode ser adicionada na emulsão asfáltica para ajudar a estabilizar a mistura reciclada e reduzir o tempo de cura.

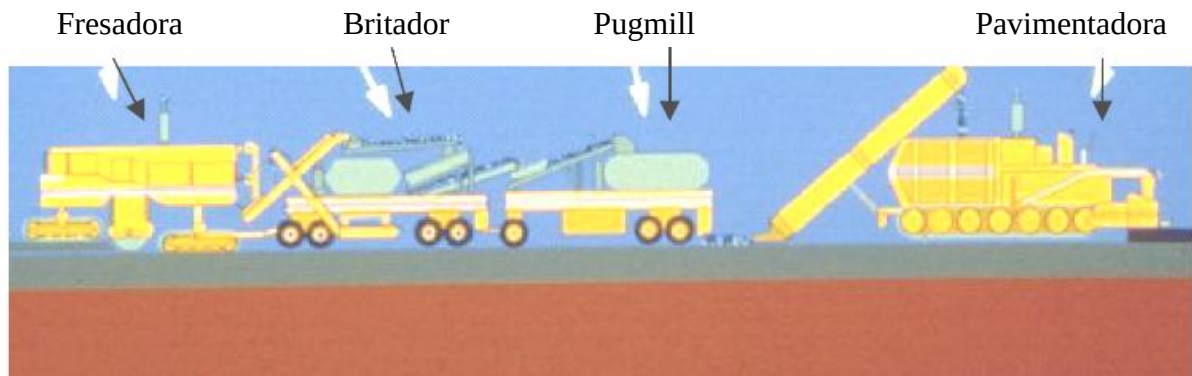


Figura 10 - Esquemática do trem de reciclagem.
Fonte: FHWA (1997).

A escolha pelo agente reciclador envolve vários fatores, incluindo a composição da estrutura existente, o tipo de solo do subleito e o objetivo da reciclagem. Se a reciclagem inclui o material da base misturado ao solo do subleito sem ser tratado, então isto requer aditivos para a estabilização do solo (PATRIOTA, 2004).

As maiores vantagens da FDR são as seguintes:

- ✓ A estrutura do pavimento pode ser melhorada significativamente, sem mudar a geometria do pavimento e reconstrução do acostamento;
- ✓ Pode restabelecer o pavimento antigo para o perfil desejado, eliminando a existência de trilhas de roda, restabelece aclive e declive, elimina buracos, irregularidades e áreas ásperas. Também, podem ser executadas operações para o alargamento do pavimento, além de possibilitar a uniformidade da estrutura do pavimento;
- ✓ Elimina trincas do tipo couro-de-crocodilo, trincas longitudinais e transversais, e a reflexão de trincas;
- ✓ Suscetibilidade ao congelamento pode ser melhorada;

- ✓ O custo de produção é baixo, e somente uma camada fina de revestimento é necessária na maioria dos projetos;
- ✓ Custos de engenharia são baixos;
- ✓ Há conservação de materiais e energia, assim como a qualidade do ar que é resultado do pó, gás e fumaça que são eliminados. Esse processo é ambientalmente correto e evita os problemas com a disposição de materiais.

O reaproveitamento em toda a espessura pode ser recomendado quando da existência de profundas trilhas de roda, trincamento por fadiga, trincamento térmico, reflexão de trincas, pavimentos com manutenções do tipo remendo, e outros. Esse método é, principalmente, utilizado quando existem problemas na base ou sub-base do pavimento.

Tratamentos em profundidade dependem de habilidade na compactação do material estabilizado e pode ser realizada até a 500 mm de espessura.

3.3.4 Reciclagem de camadas do pavimento

Esta técnica consiste na obtenção de uma nova camada de base ou sub-base estabilizada, através da adição de um novo material, geralmente inserido no material fresado. Esses materiais podem ser: cal hidratada, cimento, agregados (miúdo e/ou graúdo), emulsões, agentes químicos (por exemplo, polímeros e fibras sintéticas), etc. Esses aditivos têm por finalidade dotar o pavimento velho de características físicas apropriadas a um pavimento novo (ARAÚJO, 2004).

Os tipos de reciclagem podem ser distinguidos pelo local de produção da mistura, temperatura que a mistura é produzida, pelas características do material a reciclar e pelo tipo de asfalto utilizado. Com os equipamentos disponíveis no mercado, as técnicas de reciclagem *in situ* apresentam vantagens sobre as técnicas de reciclagem em centrais. Dentre elas, pode-se

resaltar o menor custo (uma vez que não é necessário realizar o transporte do material para uma central), redução do consumo energético e o menor desgaste das estradas existentes (uma vez que não são necessários os transportes entre o material e a usina) (FONSECA, 2002).

3.3.5 Granulometria do material fresado para fins de reciclagem

O material proveniente da fresagem de revestimentos asfálticos possui propriedades nobres que possibilitam sua reutilização através do processo de reciclagem. Porém, um dos principais problemas encontrados nos projetos de reabilitação por reciclagem é a granulometria resultante da fresagem a frio, em função do aparecimento de grumos (DNIT, 2006).

Na fresagem a frio do revestimento, ocorre a quebra de parte dos agregados, provocando a alteração da curva granulométrica do material existente na pista. Já na fresagem a quente não ocorre alteração significativa da granulometria original do material, pois a camada de revestimento aquecida oferece pouca resistência à remoção do pavimento, propiciando assim a desagregação do mesmo.

3.4 Aplicação da técnica de fresagem

A fresagem de um pavimento pode ser realizada de duas maneiras, quanto à temperatura de ocorrência: a frio ou a quente. Na primeira situação, o processo é realizado na temperatura ambiente, sem o pré-aquecimento do pavimento. Nessa situação, ocorre a quebra de parte dos agregados, havendo, assim, a alteração da curva granulométrica do material existente na pista. Já na fresagem a quente, é efetuada o pré-aquecimento do revestimento. O prévio aquecimento do material faz com que a sua resistência ao corte seja minimizada, não

ocasionando alteração significativa na curva granulométrica do material, como é o caso da fresagem a frio.

A técnica de fresagem pode ser empregada na solução dos mais variados tipos de defeitos apresentados por um pavimento. Dessa forma, a execução dos serviços dependerá de certa forma, de defeito encontrado na via. Nesse contexto, podem-se descrever diferentes procedimentos para emprego da técnica de fresagem (Bonfim, 2007).

- a) para correção de defeitos superficiais: empregada para correção de defeitos na superfície dos revestimentos, normalmente empregada para deformações plásticas ou exsudações, sendo capaz de aumentar a aderência pneu-pavimento;
- b) de áreas descontínuas: esta aplicação consiste na execução da fresagem em áreas localizadas, podendo não cobrir a largura da pista;
- c) contínuas de toda a pista: execução da fresagem em toda a pista. Essa técnica é empregada, principalmente, em pavimentos com muitos defeitos superficiais;
- d) em cunha: procedimento empregado apenas nas bordas das pistas, junto à sarjeta, com o intuito de promover a ancoragem da nova camada de revestimento;
- e) para correção da inclinação do pavimento;
- f) de arremate: esta aplicação consiste em executar a fresagem do pavimento junto às diversas interferências existente no mesmo, normalmente empregada em vias urbanas
- g) superficiais de sonorização: empregada em acostamentos. Nesse caso, a superfície fresada servirá de alerta aos usuários quando o veículo trafegar fora dos limites das faixas de rolamento.

Segundo Araújo (2004), com base na ampla potencialidade do emprego da técnica de fresagem de pavimento, tem-se utilizado esse procedimento nos mais variados tipos de problema apresentados por uma via. A técnica pode ser utilizada na correção de defeitos como:

- a) trincamento;
- b) remendo em panelas;
- c) afundamento nas trilhas de rodas: defeitos ocasionados pela utilização de uma mistura asfáltica imprópria para as condições locais ou por deficiência estrutural das camadas inferiores;
- d) deformações plásticas do revestimento: normalmente são defeitos funcionais associados à utilização de uma mistura asfáltica inadequada;
- e) agregados polidos: defeitos aonde acontece a diminuição da aderência pneu-pavimento, devido ao desgaste das arestas dos agregados;
- f) exsudação: defeitos resultante da afloração de materiais asfálticos na superfície do pavimento;
- g) bombeamento de finos: defeito presente em pavimento com alto grau de deterioração, aonde a água infiltra até as camadas inferiores da estrutura sendo, posteriormente, bombeada para a superfície, por meio da sobrecarga exercida pelo tráfego;
- h) manutenção do greide de vias que receberão camadas de recapeamento;
- i) manutenção do desnível máximo entre a pista e o acostamento.

Segundo Fonseca (2002), percebe-se que a operação de fresagem está associada à solução de inúmeros defeitos presentes em um pavimento. A escolha da solução a ser adotada dependerá do tipo de problema encontrado e dos recursos que estarão disponíveis. Cabe ressaltar que a experiência do profissional mostra-se relevante nesse momento.

Deve-se tomar cuidado em relação aos problemas que podem ocorrer devido à utilização da fresagem, pois alguns dos problemas são inerentes ao processo. Nesse sentido, uma vez executada a fresagem de um pavimento, é estabelecido um degrau na pista. Nesse caso, deve-se atentar às situações em que ocorre a liberação ao tráfego antes de ser executada a nova camada de recapeamento; dependendo da profundidade de corte, é necessário o isolamento total da área. Além disso, a técnica pode provocar o aparecimento de panelas, em virtude da desagregação do pavimento. Esse tipo de problema acontece, por exemplo, quando a espessura de corte for superior ao revestimento asfáltico.

Tem-se como prática recomendável executar o recapeamento, após a fresagem, o mais breve possível, minimizando transtornos aos usuários. O projeto realizado por um engenheiro experiente pode diminuir alguns problemas executivos inerentes ao processo. Além disso, para a execução da técnica de fresagem e até mesmo para a reciclagem do material fresado, deve-se fazer uso das especificações contidas nas normas rodoviárias. O DNER disponibiliza algumas normas com essas finalidades, podendo-se citar:

- a) DNER-ES 405/00 – Pavimentação – Reciclagem de pavimento à frio “in situ” com espuma de asfalto;
- b) DNIT 003/2005 – ES – Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina;
- c) DNIT 034/2005 – ES – Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado no local.

3.4.1 Utilização de resíduos em camadas de base e sub-base

Com base na tecnologia existente, a utilização de resíduos da construção civil tem-se mostrado uma alternativa viável na execução de camadas do pavimento. Várias cidades do

Brasil (São Paulo, Belo Horizonte, Ribeirão Preto, entre outras) e no exterior têm utilizado agregados reciclados na execução de pavimentos. Os resultados satisfatórios vêm demonstrando a boa adequação desse material para uso em pavimentos rodoviários (CARNEIRO, 2008).

As experiências realizadas em países desenvolvidos com o uso de agregado reciclado vêm consolidando sua aplicação nas construções de sub-base de estradas, nivelamentos de terrenos e drenagens (HANSEN, 1996). Países em desenvolvimento, como o Brasil, iniciaram recentemente suas experiências com a reciclagem desses resíduos na pavimentação de estradas (PINTO, 2002).

Batista (2009) realizou o estudo de caso na Estrada Nacional 226 (226 Em Portugal), no trecho compreendido entre o quilômetro 14+000 ao 43+000, que possuía a espessura original do pavimento com 8 cm de revestimento asfáltico e 20 cm de base granular. Seu trabalho avaliou a capacidade de carga através de ensaios *in situ* com deflectômetro de impacto (ver figura 11), em duas soluções adotadas para restauração da estrada existente.

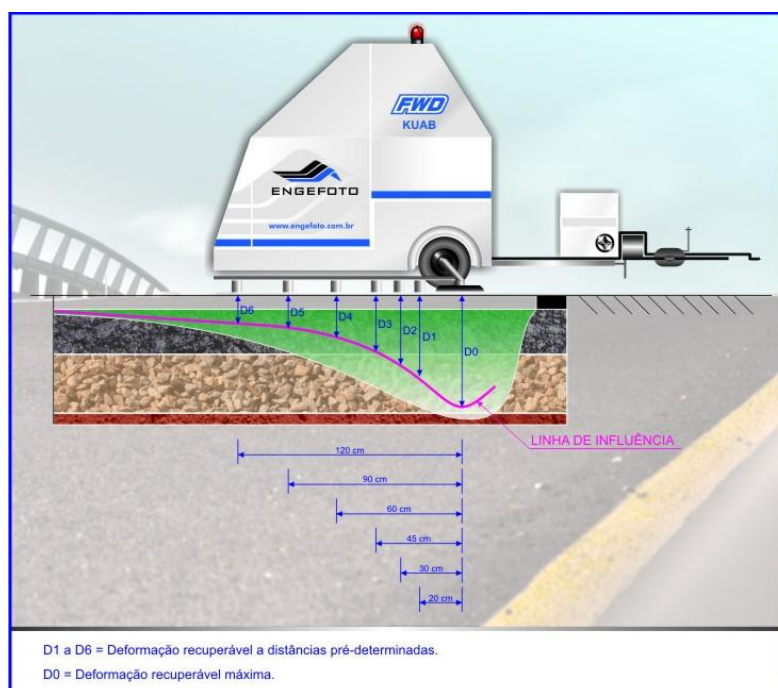


Figura 11 - Deflectômetro de impacto

Fonte : Phoenix

Na solução “A”, optou-se por realizar um reforço do pavimento existente com a aplicação de uma camada de 5 cm de mistura asfáltica densa e outra camada de 4 cm de mistura asfáltica descontínua, com asfalto modificado com borracha (MBD-BMB). Na solução “B”, optou-se por realizar uma reciclagem *in situ* numa profundidade de 20 cm, com a adição de 4% de cimento, sobre a qual se aplicou uma camada de microaglomerado asfáltico a frio, com emulsão catiônica de ruptura lenta, seguida da aplicação de uma camada de 5 cm de mistura betuminosa densa e outra camada de 4 cm de MBD-BMB. Concluiu-se que a solução de reciclagem *in situ* com a incorporação de cimento conduziu a um pavimento com maior capacidade de carga do que se obteria com o reforço convencional do pavimento.

De acordo com Batista (2009), é pertinente afirmar que o recurso à reciclagem de pavimentos, como técnica de reabilitação estrutural, particularmente a reciclagem *in situ* a frio com cimento, é viável, e deve ser tido em conta, ou pelo menos, deve ser encarado como uma hipótese possível em intervenções futuras de reabilitação de pavimentos que inicialmente se encontrem num estado de ruína generalizado. Deverá ser, assim, porque a referida técnica apresenta resultados mais favoráveis em termos de capacidade de carga do pavimento, quando comparada com a técnica do reforço normal do pavimento, como analisado no caso de estudo.

Moreira (2006), em seu artigo, procurou promover a utilização de material fresado com incorporação de pó de pedra e cimento (FPC) nas camadas estruturais de pavimentos flexíveis. Os resultados laboratoriais realizados com a mistura de FPC permitiram concluir que uma camada de sub-base de pavimento flexível executada com FPC pode resultar numa camada de elevada resistência e o aumento de resistência da camada de sub-base constituída por FPC pode refletir na redução da espessura das camadas restantes do pavimento, reduzindo o consumo de novos agregados e ligantes betuminosos. O autor concluiu que essa técnica é econômica e ambientalmente justificada, pois apresenta uma solução para a reutilização de um subproduto da construção, reduzindo a necessidade de utilizar novos agregados.

Ricci (2007) analisou em seu trabalho as propriedades mecânicas básicas do concreto compactado com rolo (CCR) para pavimentos. Sua pesquisa procurou avaliar concretos confeccionados com agregados reciclados de resíduos de demolição e construção (RCD), comparando-os com concretos elaborados com agregados naturais britados (pedra granítica). Os estudos envolveram a adição de cimento portland (CPIII-40) nos teores de 90 kg, 110 kg e 130 kg (kg/m^3 de concreto) em concretos confeccionados com agregados britados e a adição nos teores de 110 kg, 130 kg e 150 kg (kg/m^3 de concreto) em concretos confeccionados com RCD (utilizando três tipos de agregado reciclado). Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, massa específica (material compactado), porosidade e absorção. Os resultados obtidos mostraram que a resistência à compressão e à tração na flexão dos CCRs, utilizando um incremento de cimento em torno de 9% e agregados reciclados (100% agregado graúdo e 50% de pedriscos reciclados) foi o bastante para proporcionar resistências próximas aos resultados encontradas nos concretos com agregados naturais britados. A porosidade e a absorção aumentaram de forma consistente, proporcionalmente à quantidade de agregado reciclado adicionado à mistura. Houve a redução nos valores de módulo de elasticidade das misturas de CCR com agregados naturais, em relação às que utilizaram agregados reciclados. O autor relatou que a aplicação dos CCRs com agregados reciclados de RCD seria vantajosa na execução de pavimentos e pisos em que não fossem prioritárias as cargas repetitivas, que ter-se-ia o módulo de elasticidade inferior, combinado com a elevada resistência à tração na flexão.

De acordo com Ricci (2007), os estudos realizados com a incorporação de resíduos em camadas de base e sub-base de pavimentos apresentam resultados satisfatórios. Enquadram-se nessa categoria os resíduos de fresagem, colaborando, assim, com a viabilidade técnica da utilização desses materiais, após o processo de reciclagem dos pavimentos.

3.4.2 Estabilizações de solos

O solo pode ser considerado como o material de construção civil mais comum e de maior abundância na crosta terrestre. Do ponto de vista da terraplenagem e pavimentação, faz parte do subleito, sub-base, por vezes da base e até do revestimento primário. Quando as características dos solos locais não apresentam, total ou parcialmente, os requisitos exigidos, o engenheiro terá que adotar uma das seguintes atitudes (Medina, 1987):

- evitar ou contornar o terreno de baixa capacidade de suporte;
- remover o solo de baixa capacidade de suporte e substituí-lo por outro de qualidade superior;
- projetar a obra para situação de terreno de baixa capacidade de suporte de fundação (conviver com a situação difícil);
- estabilizar o solo existente.

Segundo Vogt (1971), define-se a estabilização como todo método que visa aumentar, de maneira durável, durante todas as estações do ano, a resistência de um material aos esforços desenvolvidos pelo tráfego e aos efeitos destruidores exercidos pelas intempéries.

A estabilização de um solo pode ser definida como sendo a alteração de qualquer uma de suas propriedades, de forma a melhorar seu comportamento sob o ponto de vista da engenharia. Consiste em um tratamento artificial, por um processo físico, químico ou físico-químico, tornando o solo estável para os limites de sua utilização, e ainda fazendo com que a estabilização permaneça sob a ação de cargas exteriores e também sob ações climáticas variáveis.

As propriedades de engenharia que visam modificar a estabilização de um solo, segundo (Medina; Motta, 2005) são:

- resistência ao cisalhamento, tornando-a menos sensível às mudanças ambientais, principalmente à umidade, além de torná-la compatível com as cargas que a estrutura vai absorver;
- permeabilidade, aumentando-a ou diminuindo-a;
- compressibilidade, reduzindo-a.

Podem-se destacar três métodos de estabilização de solos: mecânico, físico e químico, podendo ser adaptados e combinados para a solução de um problema.

Com relação ao solo, as seguintes propriedades devem ser consideradas, de modo a escolher o melhor método de estabilização (Kézdi, 1979):

- propriedades do solo na condição natural;
- propriedades esperadas do solo estabilizado;
- efeitos no solo estabilizado após a estabilização.

Devido à grande variabilidade de solos, nenhum método se aplica genericamente a todos os solos, cada método pode ser aplicado (ou não) para um determinado tipo de solo, não obstante, a estabilização não só deveria ser pensada em termos de tratamento corretivo, mas também como uma medida preventiva ou de segurança contra condições adversas que se desenvolvem no curso da construção ou ao longo da vida da estrutura (Ingles e Metcalf, 2002)

3.4.3 Estabilização mecânica

Soliz (2007) relata que “Considera-se a estabilização mecânica uma simples compactação do solo ou, até mesmo, a estabilização granulométrica do mesmo”.

A estabilização mecânica por compactação refere-se ao processo de tratamento de um solo com a finalidade de minimizar sua porosidade, pela aplicação de sucessivas cargas, pressupondo que a redução de volume de vazios é relacionada ao ganho de resistência mecânica (Santos, 1995).

Essa densificação é utilizada em todas as camadas do pavimento, sejam estas estabilizadas por outro processo ou não, sendo realizada por meio de equipamento mecânico, geralmente um rolo compactador, embora, em alguns casos, como em pequenas valetas, até soquetes manuais possam ser empregados (PINTO e PREUSSLER, 2002).

Por outro lado, a estabilização mecânica por correção granulométrica engloba as melhorias induzidas em um solo pela mistura deste com outros solos, que possibilitem a obtenção de um novo produto, com propriedades adequadas para determinados fins de engenharia (Santos, 1995).

Na estabilização granulométrica, procura-se obter um material bem graduado e de percentagem limitada de partículas finas, com a mistura íntima homogeneizada de dois ou mais solos e sua posterior compactação.

3.4.4 Estabilização física

Soliz (2007) relata que a estabilização mineralógica mais comumente empregada em pavimentação é a descrita no item anterior, como parte da estabilização mecânica, que consiste na modificação das propriedades do solo atuando na textura, ou seja, misturando solos com diferentes frações granulométricas. Outras técnicas envolvem tratamentos térmicos de secagem ou congelamento, tratamento elétrico e eletro-osmose, que melhoram as características estruturais e de drenagem dos solos (Macêdo, 2004). O tratamento térmico de secagem é citado por Ingles e Metcalf (2002) em estradas de terra na Índia; onde se precedeu à queima do solo no local.

Atualmente, o emprego da calcinação de argila para gerar agregados para uso em locais onde a escassez de agregados naturais, como na Amazônia, por exemplo, pode ser considerada uma forma de estabilização física, onde o uso de calor intenso por queima

controlada também provoca intensa alteração nos minerais argilosos presentes no solo (NASCIMENTO, 2005).

Cabe mencionar que as argilas plintíticas, quando escavadas em blocos e secas ao ar, constituem blocos que podem ser usados em construção civil, o que foi observado na Índia por Buchannan no século 19, que o fez criar o termo “*laterita*” – de later – tijolo, em latim.

Cristelo (2001) comenta o tratamento por aquecimento, que consiste em introduzir no solo, através de um tubo perfurado, uma mistura comprimida de ar muito quente e combustível. O aquecimento pode ser obtido por queima de combustíveis ou por processos elétricos. Outro processo térmico, por resfriamento, provoca a estabilização por congelamento artificial da água intersticial, originando um material rígido com elevada resistência. Nenhum desses processos, no entanto tem tido aplicação na pavimentação.

O processo de eletro-osmose foi estudado por Castello Branco (1978), e consiste em colocar dois eletrodos numa massa de solo e fazer passar uma corrente elétrica entre eles, isto promove a migração da água presente no solo do eletrodo positivo para o negativo, diminuindo, assim, a quantidade de água no solo e permitindo a sua consolidação. Também não tem sido aplicado em pavimentação, mas hoje mostra-se como uma alternativa viável para processo de remediação de solo contaminado.

3.4.5 Estabilização química

Soliz (2007) relata que a estabilização química consiste na adição de uma determinada substância química ao solo, de modo a provocar mudanças que influenciam as propriedades de resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade deste, atingindo-se, então, o objetivo de estabilizá-lo (Santos, 1995).

Na estabilização química, como o nome indica, há uma reação química do aditivo com os minerais do solo (fração coloidal) ou com a constituição de recheio dos poros, pelo produto

de reação química do aditivo com a água. No solo-cimento e solo-cal, existe, inicialmente, uma reação que se caracteriza melhor como físico-química: os cátions Ca^{++} liberados pela hidratação do cimento reagem com a superfície dos argilo-minerais e modificam o pH da solução eletrolítica. Os produtos cimentantes que se formam posteriormente (diz-se reação pozolânica) acrescem a rigidez da mistura (Medina, 1987).

Segundo o mesmo autor, quando se forma a mistura solo-estabilizador, pode ocorrer que o estabilizador forme ou não uma matriz contínua com o solo. Na matriz contínua, o agente estabilizador preenche todos os poros e as partículas de solo ficam nela mergulhadas como se fosse um inerte de enchimento. Neste caso, as propriedades do sistema são essencialmente as da matriz e as propriedades mecânicas do estabilizador predominam. Têm-se várias reações resultantes da mistura solo-estabilizador: reações físicas, variação de temperatura, hidratação, evaporação e adsorção e reações químicas – troca catiônica, precipitação, polimerização, oxidação, solução e carbonatação.

Na matriz descontínua, o estabilizador não preenche todos os poros e então podem ocorrer três modos de ação:

- Modificação das características das superfícies das partículas;
- Vedação inerte dos poros;
- Interconexão entre as partículas de solo (solda por pontos).

3.4.6 Solo-cimento

Macêdo (2004) relata que diversos tipos de cimentos podem ser utilizados para estabilizar praticamente todos os tipos de solos, com algumas dificuldades particulares para argilas altamente plásticas e orgânicas (contendo mais que 1% ou 2% de matéria orgânica), os quais normalmente exigem altas porcentagens de cimento para a obtenção de significativas mudanças nas propriedades mecânicas das mesmas.

Cimentos Portland são cimentos hidráulicos (ganham resistência através de reações com a água – hidratação). Os quatro componentes principais do cimento Portland são:

- Silicato Tricálcico;
- Silicato Dicálcico;
- Aluminato Tricálcico;
- Aluminoferrito Tetracálcico.

De forma geral, a quantidade de cimento necessária para estabilizar um solo aumenta com o aumento da fração de solos finos, com exceção de areias uniformes que requisitam mais cimento que solos arenosos contendo algum tipo de silte e argila.

Pode-se dividir a estabilização por cimento nas seguintes categorias (Medina, 1987):

- Solo-cimento: é um material endurecido pela cura de uma mistura íntima compactada mecanicamente com solo pulverizado, cimento Portland e água, sendo este endurecimento avaliado por critérios de durabilidade e resistência à compressão simples de corpos de prova. Normalmente é utilizado como base ou sub-base;

- solo modificado ou melhorado: é um material não endurecido ou semiendurecido que é julgado pela alteração dos índices físicos e/ou capacidade de suporte do solo. Utiliza-se um teor baixo de cimento que não deve ser maior que 5%, podendo ser utilizado como base, sub-base ou reforço de subleito;

- solo-cimento plástico: difere do solo cimento definido anteriormente, por ser utilizada uma quantidade maior de água durante a mistura, de forma a produzir uma consistência de argamassa na ocasião da colocação. É utilizado para revestimento de valas, canais e taludes.

Existem diversos métodos de dosagem para solo-cimento, destacando-se dois: O primeiro, estabelecido pela ABNT, e o segundo, chamado método físico-químico,

desenvolvido na COPPE pelo Prof. Casanova. Ambos os métodos encontram-se descritos em Macêdo (2004).

3.4.7 Solo-cal

Macêdo (2004) relata que a quantidade de cal necessária para o tratamento de solos depende das características do solo e características mecânicas desejadas da mistura. O tratamento de solos com cal pode ser dividido em duas classes gerais: (a) modificação do solo com cal, a qual reduz a plasticidade do solo, melhora a trabalhabilidade, aumenta a resistência de flocculação e à erosão; (b) estabilização do solo com cal, a qual fornece aumento permanente da resistência e rigidez do solo, devido à ocorrência de reações pozolânicas.

O tratamento de solos com cal não é eficiente em solos com baixo teor de argila, uma vez que o melhoramento das propriedades mecânicas é produzido pelas reações entre a cal e os minerais argílicos. Todos os minerais argílicos reagem com a cal, com a resistência das reações, geralmente aumentando na proporção da quantidade de sílica disponível.

Quatro tipos básicos de reações que ocorrem em solos coesivos são tratados com cal: (a) carbonatação, (b) troca catiônica, (c) flocculação-aglomeração, e (d) reações pozolânicas.

A carbonatação ocorre quando o dióxido de carbono existente no ar ou em água estagnada entra em contato com a matriz solo-cal e converte a cal novamente em carbonato de cálcio. O carbonato de cálcio é uma cimentação fraca e solubiliza na água ácida. A carbonatação é indesejável, uma vez que reduz a quantidade de cal disponível para produzir as reações pozolânicas (cimentícias).

Cal misturada com água resulta em cátions de cálcio livres, os quais podem substituir outros cátions dentro das complexas trocas catiônicas que ocorrem no solo. A troca catiônica é, ao menos parcialmente, responsável pela flocculação e aglomeração de partículas de argila que ocorre em solos tratados com cal. O resultado prático da flocculação-aglomeração é a

mudança na textura do solo, uma vez que as partículas de argila unem-se e formam partículas de dimensões maiores.

As reações pozolânicas são similares àquelas que ocorrem em solos tratados com cimento. É sabido que a cal e a água reagem com sílica e alumina existentes no solo para formar vários componentes cimentícios. Origens típicas de sílica e alumina em solos incluem minerais argílicos, quartzo, feldspato, micas e outros silicatos ou alumino-silicatos similares, com estrutura cristalina ou amorfa. A adição de cal também aumenta o pH do solo, aumentando a solubilidade da sílica e da alumina presentes no solo. Se uma quantidade significativa de cal é adicionada ao solo, o pH pode alcançar 12,4, que é o pH da água saturada com cal.

O efeito da cal nas propriedades do solo pode ser visto sob vários aspectos:

- distribuição granulométrica: há uma modificação da granulometria do solo devido à ocorrência de floculação-aglomeração e que quanto maior a quantidade de cal, maior a floculação;
- plasticidade: o limite de plasticidade (LP) cresce com o uso da cal e o limite de liquidez (LL) tende a diminuir. O aumento do teor de cal acarreta valores de índice de plasticidade (IP) cada vez menores;
- variação de volume: o tratamento de um solo expansivo com cal reduz as variações de volume do solo quando este absorve água;
- compactação: a densidade diminui e o teor de umidade ótima aumenta, quando se trata um solo com cal;
- resistência: (Consoli, 1997) verificou que o teor de cal e o tempo de cura são fatores que influem no aumento da resistência à compressão simples, num solo estabilizado com cal.

Quanto maior o teor de cal, maior a troca catiônica e a formação de produtos cimentantes, mas não existe um teor ótimo de cal a ser adotado para todos os solos, sendo a experiência de campo e laboratório, decisiva para a escolha do teor de cal.

3.5 Solos da cidade de Manaus

Na cidade de Manaus, aflora um espesso pacote sedimentar argilo-arenoso de cor amarela, de idade cenozóica, considerado correlato da “argila de Belterra” (Sombroek, 1996) aflorante no estado do Pará.

A origem dessa cobertura argilo-arenosa ainda é controversa, alguns autores consideram-na uma unidade sedimentar do período Terciário, em que o ambiente era semi-árido (Kotschoubey, 1984; Kotschoubey; Truckenbrodt, 1981; Truckenbrodt; Kotschoubey, 1981); já Sombroek (1996) considera essa unidade como sendo de origem lacustre, no Terciário. Outra linha de pensamento define esta unidade como sendo “um horizonte argiloso, derivado de alterações *in situ* de sedimentos da Formação Alter do Chão (Irion, 1984; Fernandes Filho, 1997; Costa, 1994), considerando que este pacote argilo-arenoso seja resultado do intemperismo de crostas lateríticas ferruginosas e aluminosas.

Devido à escassez de informações e inconsonâncias entre as hipóteses acerca da origem desta unidade na região da cidade de Manaus, e tendo em vista que as determinações dessas características fogem ao escopo deste trabalho, será utilizada aqui a denominação “Cobertura Argilosa do Terciário/Quaternário”, visto que tal denominação abrange todas as propostas acima citadas, sem que haja empecilhos para aplicação na área estudada.

Na cidade de Manaus foram descritas duas unidades predominantes de solos: os latossolos e os podzóis, que são resultado da ação intempérica sobre os sedimentos da formação Alter do Chão, cobertura argilosa do terciário/quaternário e lateritos.

Segundo Vieira (1975), os latossolos são solos não hidromórficos que apresentam um perfil normalmente profundo, onde o teor de argila se dilui lentamente em profundidade, são solos envelhecidos, ácidos a fortemente ácidos (com exceção dos eutróficos), com boa drenagem, apesar de serem muitas vezes bastante argilosos. São caracterizados pela composição química, composta por sesquióxidos, argilo-minerais silicatados de retículo (grupo da caulinita), quartzo e outros minerais silicatados, fortemente resistentes à intemperização.

São encontrados sob a vegetação de florestas densa, aberta e mista com palmeiras, frequentemente em relevo plano e suave ondulado, podendo ocorrer em relevo ondulado (Vieira, 1975).

Segundo Souza (1991), os solos com horizonte podzol são pouco profundos, imperfeitamente drenados a mal drenados, com horizonte A2 Arenoso, extremamente lavado, de coloração esbranquiçada, que é de acumulação de húmus e sesquióxidos ou ferro e/ou alumínio. Na região Norte ocorre apenas o Podzol hidromórfico, sendo sua caracterização sintetizada a seguir:

Podzóis Hidromórficos são solos minerais hidromórficos com horizonte B podzol ou espódico, subjacente a um horizonte A2 alvíco. Possuem sequência de horizontes A1, A2, Bh ou Bhir e C, com nítida diferenciação entre os horizontes.

Tem valores muito baixos para soma e saturação de bases, são ácidos e possuem elevada saturação com alumínio trocável. Verifica-se, em consequência disso, forte deficiência quanto à fertilidade.

A figura 12 apresenta o mapa de lineamentos morfoestruturais, obtido a partir da análise integrada de lineamentos de relevo da cidade de Manaus. A figura 13 apresenta o mapa de correlação de lineamentos morfoestruturais na cidade de Manaus e as zonas de falhas.

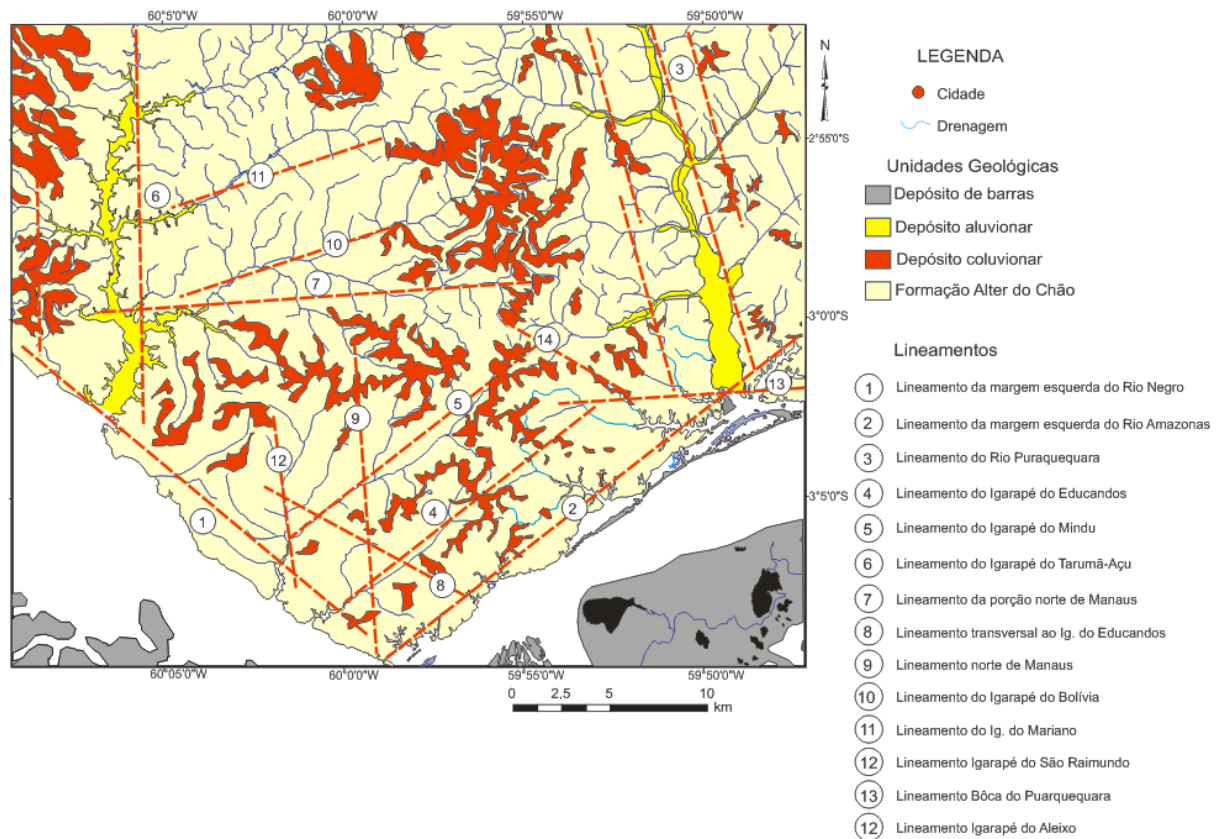


Figura 12 - Mapa de lineamentos morfoestruturais da cidade de Manaus, obtido a partir da análise integrada de lineamentos de relevo, drenagem, modelo SRTM e imagens de satélite Landsat.

Fonte: Silva (2005).

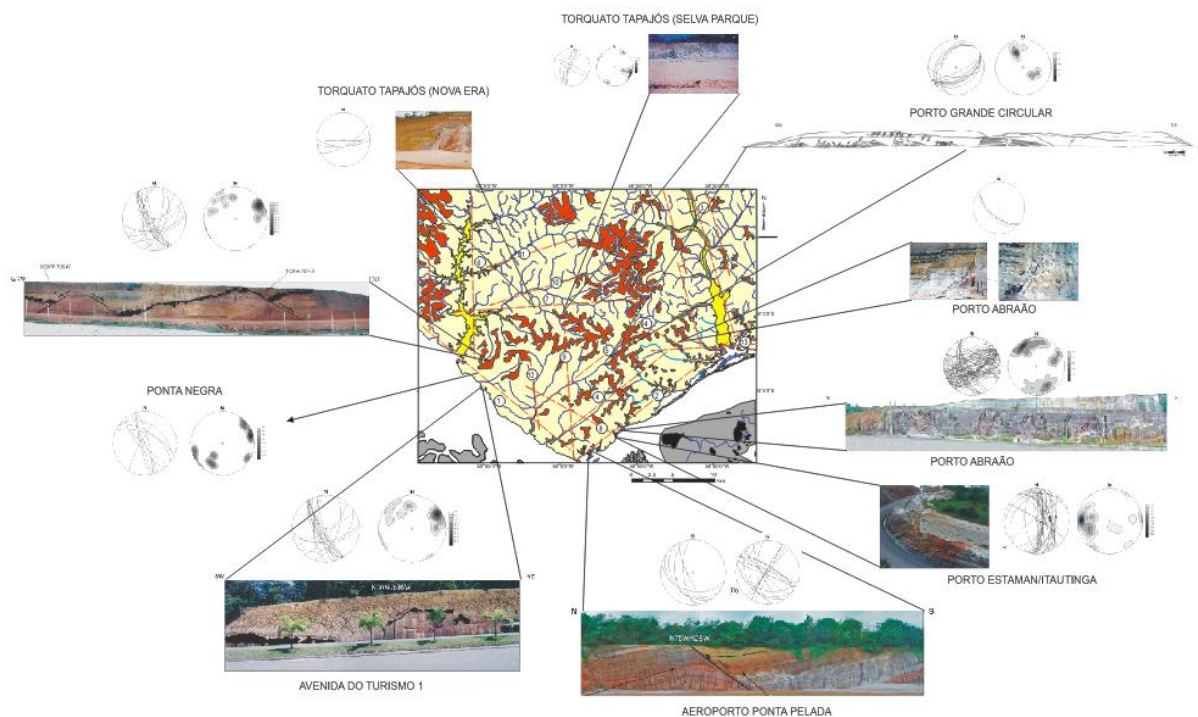


Figura 13 - Mapa de correlação de lineamentos morfoestruturais na cidade de Manaus e as zonas de falhas mapeadas por Silva (2005).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Considerações gerais

Neste capítulo são apresentados os ensaios estabelecidos, com o objetivo principal de investigar o efeito da adição do resíduo fresado do pavimento asfáltico (RFA) nas propriedades de um solo argiloso, em diferentes percentuais de RFA, com adição de 2% e 4% de cimento. Para tal, foram desenvolvidos ensaios que se baseiam em duas etapas distintas.

Na primeira etapa, foi realizado o estudo do comportamento mecânico dos materiais por meio de ensaios de laboratório, deste os ensaios de caracterização mais simples, até os mais complexos, englobando os ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral, resistência à tração por compressão diametral e ensaios de fadiga por compressão diametral. Na segunda etapa, foi avaliado o comportamento dos materiais envolvido no dimensionamento de uma estrutura de pavimento típica para nossa região, mediante uso de um programa computacional denominado SisPav.

As etapas de detalhamento são descritas neste capítulo, bem como a descrição dos materiais utilizados na pesquisa, os métodos utilizados na preparação das amostras, detalhes de execução dos ensaios e equipamentos utilizados nos ensaios de laboratório.

Os ensaios experimentais desta pesquisa foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Tecnologia na Universidade Federal do Amazonas – LPAV/UFAM, na cidade de Manaus, e no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ, na cidade do Rio de Janeiro.

4.2 Origem e características físicas do solo utilizado

4.2.1 Origem

O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado na região Norte do Campus Universitário da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, nas mediações da Faculdade de Tecnologia, na cidade de Manaus, em uma profundidade de um metro a dois metros. As amostras de solo coletadas são típicas do subleito dos pavimentos locais, com predominância de fração argilosa. A figura 14 ilustra a localidade, onde foram coletadas as amostras de solo. Local da coleta de solo de referência, $3^{\circ} 5' 16,21''$ S / $55^{\circ} 57' 45,60''$ O.



Figura 14 - Mapa, ilustrando o local da coleta do solo de referência.

Os resíduos produzidos pela fresagem do pavimento asfáltico foram coletados na região do bairro da Cidade Nova, na Av. Camapuã, dando se início a - $3^{\circ} 1' 55,17''$ S / $55^{\circ} 57' 51,61''$, e finalizando se em $3^{\circ} 1' 41,96''$ S / $59^{\circ} 57' 42,05''$ O. Sendo a profundidade da fresagem de aproximadamente 35 cm, visto que já existiam várias camadas de revestimento

asfálticos sucessivos, uma sobre as outras, desnivelando o greide da via de rolamento. A figura 15 ilustra a localidade das extrações do pavimento fresado.



Figura 15 - Mapa de localização da coleta do resíduo produzido pela fresagem do pavimento asfáltico.

4.2.2 Massa específica e limites de consistência do solo de referência e das misturas com resíduo fresado do pavimento asfáltico

Os procedimentos para a determinação da massa específica do solo e das misturas foram executados segundo o método de ensaio “Determinação da Massa Específica” – NBR 6490 (1984), “Solo – Determinação do limite de plasticidade e limite de liquidez” – NBR 7180 (1984). As figuras 16 a 21 mostram a sequência dos ensaios.



Figura - 16.



Figura - 17.



Figura - 18.



Figura - 19.



Figura - 20.



Figura - 21.

Figuras 16 a 21 - Sequências dos ensaios da massa específica e limites de consistência do solo de referência e das misturas com resíduo fresado do pavimento asfáltico.

4.2.3 Granulometria do solo de referência e das misturas com resíduo fresado do pavimento asfáltico

Os procedimentos estão de acordo com o método de ensaio “Solo – Análise Granulométrica” – NBR 7181. As figuras 22, 23 e 24 mostram a sequências dos ensaios.



Figura - 22.



Figura - 23.



Figura - 24.

Figuras 22 a 24 - Sequências dos ensaios de granulometria do solo de referência e das misturas com resíduo fresado do pavimento asfáltico.

4.2.4 Umidade ótima e massa específica aparente seca máxima

Foram realizados ensaios de compactação, correspondentes à energia modificada do ensaio Proctor, segundo procedimentos preconizados na norma (DER-ME 13/71), para o solo de referência sem mistura; posteriormente, foram realizadas os ensaios com os percentuais correspondentes ao RFA, que foram de 20%, 40% e 60%, e com adição de 2% e 4% de cimento na mistura com 60% de material fresado, respectivamente.

A compactação dos corpos-de-prova foi executada num cilindro de 10,05 cm de diâmetro e 12,70 cm de altura, com soquete de 4,540 kg para energia modificada e 26 golpes por camada. As figuras 25 a 30 mostram a sequências dos ensaios.



Figura - 25.



Figura - 26.



Figura - 27.



Figura - 28.



Figura - 29.



Figura - 30.

Figuras 25 a 30 - Sequências dos ensaios da umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.

4.2.5 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

Foram realizados ensaios, segundo procedimentos preconizados na norma (ISC ou CBR - *California Bearing Ratio*), padronizado no Brasil pela Norma DNER-ME 049/94. Através do ensaio de ISC, é possível conhecer qual será a expansão de um solo sob um pavimento quando este estiver saturado, e fornece indicações, de caráter empírico, da perda de resistência do solo com a saturação. O melhor resultado entre as misturas foi 60% RFA e 40% solo de referência, com isso adicionou-se cimento na percentagem de 2% e 4%, no intuito de melhorar ainda mais a sua resistência, além de ser uma técnica comum em serviços de campo. As figuras 31 a 36 mostram a sequências dos ensaios.



Figura - 31.



Figura - 32.



Figura - 33.



Figura - 34.



Figura - 35.



Figura - 36.

Figuras 31 a 36 - Sequências dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC).

4.2.6 Cimento

O cimento empregado neste trabalho é o Portland com adição de Pozolana, CP II-Z-32, de marca Nassau. Este é um cimento muito encontrado na região de Manaus, sua resistência é de 32 MPa e sua massa específica é de 3150 kg/m³. O CP II-Z-32 leva, em sua composição, de 6% a 14% de pozolana. Suas propriedades químicas e físicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Ensaaios físicos e químicos do cimento CP-II-Z-32
Fonte: Cimento Nassau.

Ensaaios Físicos		
Blaine (cm ² /g)	≥2600	NBR NM 76
Tempo de início de pega (h:min)	≥1	NBR NM 65
Tempo de fim de pega (h:min)	≤10	NBR NM 65
Finura na peneira # 200 (%)	≤12,0	NBR 11579
Finura na peneira # 325 (%)	-	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	≤5,0	NBR 11582
Consistência normal (%)	-	NBR NM 43
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	-	NBR 7215
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	≥10,0	NBR 7215
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	≥20,0	NBR 7215
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	≥32,0	NBR 7215
Ensaaios químicos		
Perda ao fogo (%)	≤6,5	NBR 5743
Resíduo insolúvel (%)	≤16,0	NBR 5744
Trióxido de enxofre - SO ₃ (%)	≤4,0	NBR 5745
Óxido de cálcio livre - CaO Livre (%)	-	NBR 7227
Óxido de magnésio - MgO (%)	≤6,5	NBR 9203

4.2.7 Resistência à Compressão Simples

Este ensaio é comumente realizado para avaliar solos estabilizados quimicamente, tais como solo-cimento, solo-cal. O presente ensaio teve como objetivo principal verificar a possível redução do teor de cimento necessário para atingir a resistência simples maior ou igual a 2,1 MPa, na mistura de solo-cimento com o RFA, recomendada pela norma da ABNT NBR 12253 (Solo-cimento - Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento). Para cada mistura, foram moldados e reproduzidos três corpos-de-prova. A norma prescreve o rompimento com sete dias. Após os dias de cura, realizaram-se ensaios de resistência à compressão simples. Os ensaios foram realizados no laboratório de pavimentação da Faculdade de Tecnologia, na Universidade Federal do Amazonas –LPAV/FT/ UFAM. As figuras 37 a 42 mostram a sequências dos ensaios.



Figura - 37.



Figura - 38.



Figura - 39.

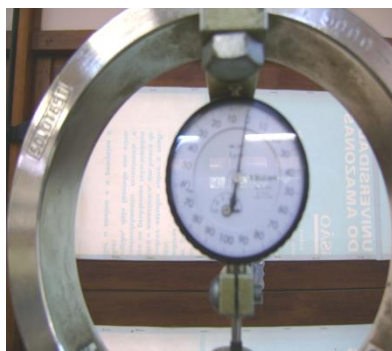


Figura - 40.



Figura - 41.



Figura - 42

Figuras 37 a 42 - Sequências dos ensaios de Resistência à Compressão Simples.

4.2.8 Módulo de Resiliência do solo de referência e das misturas com resíduo fresado do pavimento asfáltico

Nos ensaios triaxiais de carga repetida, uma tensão vertical ou tensão de desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$) é aplicada no topo da amostra, sempre no esforço de compressão, de forma cíclica, promovendo um carregamento e descarregamento, dependendo da frequência e magnitude que se deseja, enquanto a tensão confinante, σ_3 , permanece constante.

Numa fase inicial, promove-se o acondicionamento do material a ensaiar, eliminando ou minimizando os efeitos da deformação plástica e da história de tensões.

A segunda fase é a realização do ensaio para obtenção do módulo resiliente (MR), com aplicações de pares de tensões-desvio (σ_d) e confinante (σ_3), medindo-se a deformação específica resiliente.

Com o módulo e a relação entre a tensão e a deformação resiliente, pode-se obter o módulo para qualquer par de tensões-desvio e confinante, que possibilita determinar o comportamento elástico do material, em função de parâmetros experimentais e das tensões atuantes no pavimento e subleito.

Os procedimentos para a realização do Ensaio Triaxial Dinâmico, para a determinação do Módulo de Resiliência em amostras de solos, são descritos no método ME 131/94, Solo – Determinação do Módulo de Resiliência do DNER.

A seguir, são apresentadas as diversas fases de execução do ensaio em amostras, conforme realizado no LPAV/FT/UFAM, em conjunto com o laboratório de Geotecnia/Pavimentos da COPPE/UFRJ.

1. Preparação dos Corpos de Prova:

Os corpos de prova usados nesta pesquisa foram confeccionados em Manaus, no LPAV/FT/UFAM, e transportados, via aérea, para o laboratório de Geotecnia/Pavimentos da COPPE/UFRJ. As figuras 43 a 51 mostram a sequência dos ensaios até o acondicionamento

dos corpos de prova, posteriormente envolvidos em filme plástico, para manter a umidade ótima, e armazenados em caixas de madeira, para manter sua integridade física, até o seu destino final.



Figura - 43.



Figura - 44.



Figura - 45.



Figura - 46.



Figura - 47.



Figura - 48.



Figura - 49.



Figura - 50.



Figura - 51,

Figuras 43 a 51 - Sequências das confecções dos corpos de prova para os ensaios de Módulo de Resiliência do solo de referência e das misturas com resíduo fresado do pavimento asfáltico.

Inicialmente, foram realizados os procedimentos normalmente adotados para ensaios em amostras deformadas de solos, isto é, secagem, destorroamento e quarteamento. Em seguida, determinou-se a umidade higroscópica e obteve-se a massa específica seca máxima e a umidade ótima, através das curvas de compactação da energia Proctor modificado, para o solo puro (de referência) e para todas as misturas de solo com o resíduo produzido pela fresagem do pavimento asfáltico e suas respectivas porcentagens (20% RFA + 40% Solo), (40% RFA + 60% Solo), (60% RFA + 40% Solo), (60% RFA + 40% Solo + 2% de Cimento) e (60% RFA + 40% Solo + 4% de Cimento), envolvidos no desenvolvimento desta pesquisa. Deve-se tomar uma quantidade de solo suficiente para preencher o molde de compactação e adicionou-se água até atingir a umidade ótima, sendo então os materiais homogeneizados e acondicionados em sacos plásticos, hermeticamente fechados, que ficou em câmara úmida, por um período mínimo de 12 horas, exceto para as misturas com adição de cimento. Decorrido o tempo mínimo para a distribuição homogênea da umidade ótima no solo, procedeu-se à compactação do material, em cinco camadas, por impacto de 26 golpes por camada, através de um soquete manual, com massa de 4,536 kg e altura de 45,77cm, na energia modificada.

A compactação do material foi realizada em um cilindro, fixado em uma base de aço, com dois parafusos e abertura lateral regulável, de modo a desapertar e retirar o corpo de prova após a compactação. Este molde possui as dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura (razão 1:2) que é compatível com a granulometria fina do solo e do material granular até uma polegada de diâmetro. Em caso de materiais mais graúdos, deve-se utilizar o molde de dimensões 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, sendo este empregado para bases de brita graduada ou corrida ou lastro de ferrovia. Após a conclusão do processo de compactação, foi determinada a massa do corpo de prova e do cilindro, sendo, em seguida,

afrouxados os parafusos da base e da lateral do cilindro, permitindo remover o corpo de prova de seu interior, sem que ocorressem danos ao mesmo.

Já no laboratório de Geotecnia da COPPE, o corpo de prova foi envolvido com uma membrana de látex, estando o mesmo assentado em uma base porosa e com o cabeçote já posicionado sobre o corpo de prova. Para garantir o confinamento elástico, foi colocada uma membrana elástica no cabeçote e na base do aparelho. As figuras 52, 53 e 54 apresentam esses procedimentos.



Figura - 52.



Figura - 53.



Figura - 54.

Figuras 52 a 54 - Sequências dos procedimentos que precedem os ensaios de Módulo de Resiliência.

2. Montagem do Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas (RAMOS, 2003):

Para que se tenha uma garantia na qualidade do ensaio triaxial de carga repetidas, é necessário muito cuidado na montagem do corpo de prova no aparelho de ensaio, cujo esquema ilustrativo é apresentado na figura 55, onde se verifica os diversos componentes do equipamento. De forma sucinta, os procedimentos adotados são:

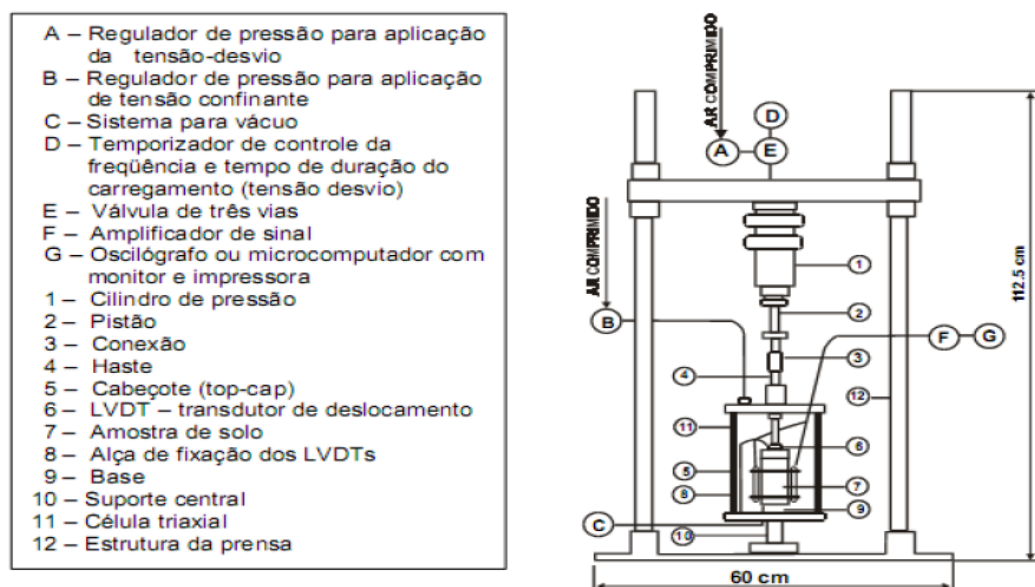


Figura 55 - Esquema do ensaio Triaxiais de Carga Repetida (RAMOS, 2003).

Novamente, promoveu-se o ajuste dos transdutores, a figura 56 apresenta esse procedimento, através de guias na base do aparelho e observando o monitor do computador, que registra os deslocamentos dos LVDTs;

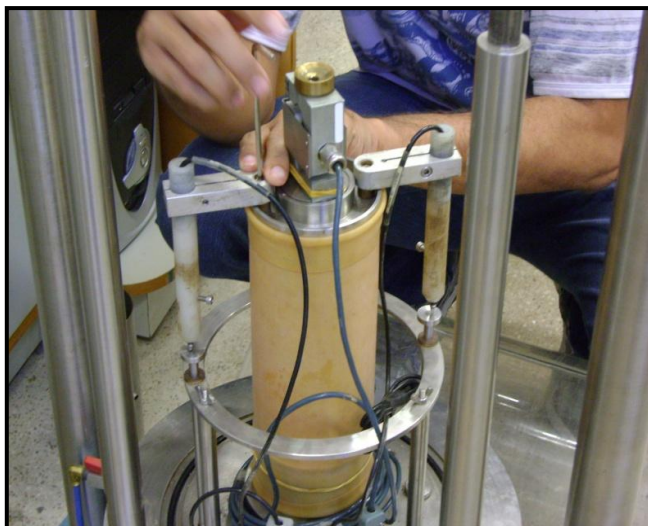


Figura 56 - Fixação dos transdutores no corpo de prova com mecano-eletromagnético do tipo LVDT.

- Colocação do invólucro cilíndrico da câmara e da placa superior de vedação, sendo corretamente fixadas;
- Após condicionamento, ajustaram-se novamente os transdutores e iniciou-se o ensaio triaxial, onde as condições para o ensaio já foram programadas;
- Com os dados do material, do molde e da energia de compactação utilizada registrada na tela de comando do ensaio, deu-se início ao condicionamento, que é a aplicação de 500 pulsos de carga, para minimizar os efeitos da deformação plástica e do histórico de tensões, sendo que o equipamento triaxial da COPPE/UFRJ já está automaticamente programado para realização desta fase. A figura 57 mostra esse procedimento;

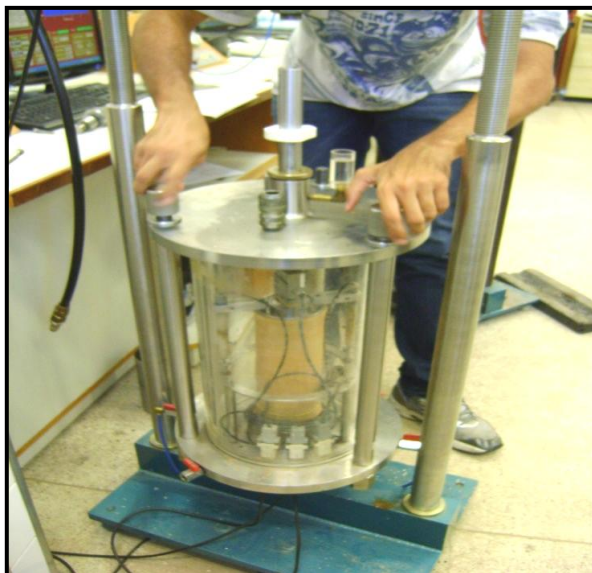


Figura 57 - Ajuste do invólucro cilíndrico da câmara na placa superior de vedação

- Ao término do ensaio, pode-se verificar os valores e os gráficos diretamente no monitor, possibilitando sua impressão imediata. A figura 58 apresenta esse procedimento.

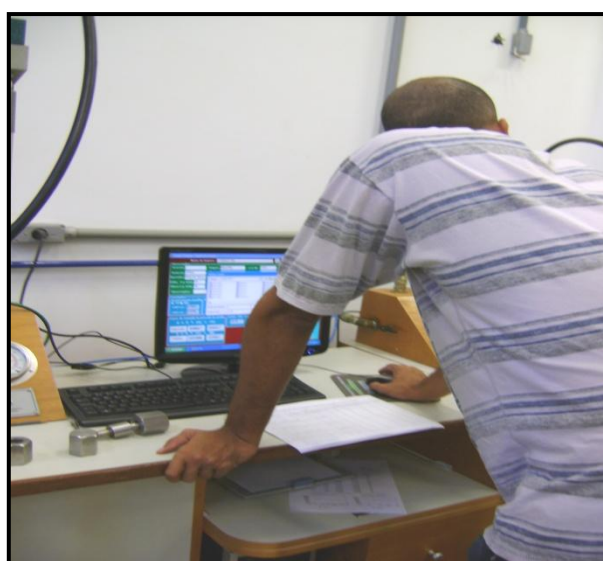


Figura 58 - Procedimento de entrada de dados para se iniciar o ensaio de módulo de resiliência e o acompanhamento do ensaio, em tempo real.

- Caso todos os pontos tenham sido computados ou nenhuma anomalia verificada, o ensaio pode ser dado como terminado e o corpo-de-prova deve ser retirado imediatamente, para pesagem e secagem em estufa. As figuras 59 e 60 mostram, respectivamente, esses procedimentos. Havendo qualquer anomalia nos resultados, pode-se imediatamente reiniciar o ensaio triaxial, sem a necessidade de proceder ao condicionamento.



Figura 59 - Pesagem do corpo de prova após o ensaio de módulo de resiliência.



Figura 60 - Corpo de prova em estufa após o ensaio de módulo de resiliência até a sua constância de massa.

Para melhor ilustração do ensaio, a Figura 61 apresenta o equipamento de Ensaio Triaxial de Carga Repetida do Laboratório de Geotecnia/Pavimentos da COPPE/UFRJ, usado nesta pesquisa.



Figura 61 - Equipamento triaxial de carga repetida do laboratório de Geotecnia/Pavimentos da COPPE/UFRJ, usado nesta pesquisa.

Em linhas gerais, a metodologia empregada atualmente pela COPPE/UFRJ, para realização dos ensaios triaxiais dinâmicos, independentemente do material e da energia, considera, para a fase de condicionamento, a aplicação de cerca de 500 vezes o par de tensões desvio e confinante, com os níveis de tensões apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Níveis de tensões aplicados na fase de condicionamento (COPPE/UFRJ).

Tensão confinante, σ_3 (MPa)	Tensão desvio σ_d (MPa)	Razão de tensões, σ_1/σ_3
0,07	0,07	2
0,07	0,21	4
0,105	0,315	4

Durante a fase de ensaio para obtenção do módulo, são aplicados os níveis de tensões apresentados na Tabela 3. Aplicam-se cerca de 5 vezes a tensão-desvio, ou mais, caso o programa não registre um bom sinal.

Tabela 3 - Níveis de tensões utilizados durante o ensaio triaxial dinâmico especificado pela COPPE/UFRJ.

Tensão confinante σ_3 (MPa)	Tensão desvio σ_d (MPa)	Razão de tensões σ_1/σ_3
0,021	0,021	2
	0,041	3
	0,062	4
0,034	0,034	2
	0,069	3
	0,103	4
0,051	0,051	2
	0,103	3
	0,155	4
0,069	0,069	2
	0,137	3
	0,206	4
0,103	0,103	2
	0,206	3
	0,309	4
0,137	0,137	2
	0,275	3
	0,412	4

4.2.9 Caracterização do resíduo produzido pela fresagem do pavimento asfáltico.

4.2.9.1 Análise granulométrica por peneiramento

A análise granulométrica foi realizada antes e após a extração do cimento asfáltico de petróleo (CAP). Primeiramente, foram realizados ensaios de granulometria por peneiramento, conforme os procedimentos constantes na especificação de serviço (DNIT 031/06 – ES), adotando os limites da faixa C. O projeto das misturas asfálticas fresadas respeitavam os

limites da faixa C do DNIT, então, julgou-se coerente adotar essa faixa da norma para as análises granulométricas do material fresado.

Verificou-se que para destorroar as amostras, fez-se necessário o aquecimento da mesma, por aproximadamente 30 minutos em estufa, a 100 °C, pois sem o devido aquecimento, os grumos não se separariam. As figuras 62 e 63 mostram o quarteamento do resíduo fresado do pavimento asfáltico e a estufa para o seu prévio aquecimento, antes do destorroamento, para que se possa fazer o peneiramento do material acima citado.



Figura 62 - Amostra de RFA.



Figura 63 - Estufa para aquecer o RFA.

4.2.9.2 Determinação do teor de CAP

Os procedimentos para a determinação do teor de cimento asfáltico de petróleo utilizando o solvente do tipo xileno (CAP), por meio de centrifugação, foram executados segundo o método de ensaio (DNER – ME 053/94). Para este estudo de laboratório, foram ensaiadas três amostras. A figura 64 mostra o aparelho que foi usado para a extração do CAP envelhecido do RFA. Esses procedimentos foram realizados no LPAV/FT/UFAM.



Figura 64 - Extrator por centrifugação usado para extrair o CAP do RFA.

4.2.9.3 Determinação da massa específica real, massa específica aparente e absorção do agregado graúdo (seixo).

Os procedimentos para a determinação da massa específica, da massa específica aparente, massa específica saturada superfície seca e da absorção de água dos agregados graúdos (seixo), na condição saturada superfície seca estão de acordo com a NBR NM 53/2002, (Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água).

As sequências de ensaios foram a seguinte:

- passar a amostra de agregado na peneira de 4,75mm por via seca e desprezar o material passante;
- em seguida, lavar o agregado graúdo retido na peneira para eliminar o pó;
- secar a amostra de ensaio até massa constante a uma temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- deixar esfriar à temperatura ambiente;
- pesar 3 kg de referida amostra e submergi-la em água à temperatura ambiente, por um período de (24 ± 4) horas;

- retirar a amostra da água e envolvê-la em um pano absorvente, até que toda água visível seja eliminada da superfície da amostra;
- imediatamente após ser enxugada, pesar a amostra com precisão de 1g (agregado saturado com superfície seca);
- colocar a amostra no cesto de arame da balança hidrostática e submergi-la em água em seguida, pesar a amostra submersa com precisão de 1g (massa do agregado submerso);
- secar a amostra a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ até massa constante, deixar esfriar por um período de (1 ± 3) horas ou até que o agregado esteja a uma temperatura que permita sua manipulação (agregado seco).

4.2.9.4 Massa específica do agregado miúdo (areia)

Os procedimentos para a determinação da massa específica do agregado miúdo (areia) foram executados utilizando o frasco de Chapman, segundo o método DNER – ME 194/98, (Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman), como mostra a figura 65.



Figura 65 - Ensaio para a determinação da massa específica da areia utilizando o frasco de Chapman.

4.2.9.5 Misturas asfálticas a quente

O primeiro procedimento de dosagem documentado para misturas asfálticas é conhecido como método Hubbard-Field. Ele foi originalmente desenvolvido para dosagem de misturas de areia e asfalto (composta de agregados miúdos e ligantes) e posteriormente modificado para aplicação em misturas com agregados graúdos (*Asphalt Institute*, 1956). Segundo Robert *et al.* (1996), entre 1940 e metade da década de 1990, 75% dos departamentos de transportes norte-americanos utilizavam o método Marshall e 25% o método Hveem. A partir de então, foi introduzido o método Superpave, que vem gradativamente substituindo os outros dois. No Brasil, tem-se utilizado principalmente o método Marshall, tendo o uso do método Superpave sido mais restrito às pesquisas no âmbito das universidades do país (BUDNY, 2012).

A norma (DNER- ME 43/95), que trata do método de dosagem Marshall, recomenda o esforço de compactação de 50 golpes para pressão de pneu até 7 kgf/cm² e de 75 golpes para a pressão de 7 kgf/cm² a 14 kgf/cm². Não há na norma, nenhuma recomendação com relação à frequência da aplicação dos golpes. Observa-se ainda que a porcentagem-alvo deve estar enquadrada dentro da faixa selecionada, e, no caso presente adotou-se a faixa C do DNIT, conforme mencionado nos itens anteriores.

4.2.9.6 Moldagem dos corpos-de-prova em laboratório

Seguindo o objetivo de avaliar a utilização do RFA para o recapeamento de vias de rolamento para as diversas solicitações de tráfego de veículos, moldaram-se vários corpos de prova para ensaios mecânicos. Os corpos-de-prova foram armazenados de forma adequada em caixas de madeira, para o transporte até seu destino final, no Laboratório de Pavimentação da

COPPE/UFRJ. As misturas foram dosadas com o cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70), proveniente da Refinaria da REMAN/PETROBRAS, localizada em Manaus.

Obedecendo ao projeto original da mistura que seguia os parâmetros da faixa C do DNIT, a temperatura do ligante não foi inferior a 107 °C nem superior a 177 °C, a temperatura dos agregados foi de 10 °C a 15 °C, acima da temperatura definida para o ligante, sem ultrapassar 177 °C. A adoção de teores de asfalto para diferentes grupos de corpos-de-prova (CPs) a serem moldados, com cada grupo tomado por três CPs, com os teores de CAP para a granulometria selecionada em percentual de massa, é mostrada na Tabela 4.

Tabela 4 - Ajuste do percentual em massa dos agregados em função do teor de CAP, traço padrão.

Teor de (CAP) %	0,0	3,50	4,0	4,5	5,0	5,50
Seixo	58,00	55,97	55,68	55,39	55,1	54,81
Areia	37,00	35,71	35,52	35,34	35,15	34,97
Filler	5,00	4,83	4,80	4,78	4,75	4,73

Conforme a experiência do projetista, para a granulometria selecionada, é sugerido um teor de asfalto entre (T+0,5% e T+1,0%) e (T-0,5% e T-1,0%). Os CPs foram moldados conforme indica a sequência das figuras 66 a 77, respectivamente.

Para a determinação do teor de projeto do ligante asfáltico, tomam-se como parâmetro as curvas conhecidas como curvas característica do ensaio Marshall, e, a partir delas, pode-se determinar o teor ótimo de CAP para o agregado misturado. Para facilitar a visualização dos resultados, é conveniente alinhar verticalmente os valores dos teores de CAP, o roteiro para obtenção é o seguinte:



Figura - 66.



Figura - 67.

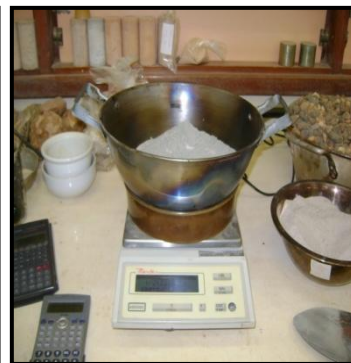


Figura - 68.



Figura - 69.



Figura - 70.



Figura - 71.



Figura - 72.



Figura - 73.



Figura - 74.



Figura - 75.



Figura - 76.



Figura - 77.

Figuras 66 a 77 - Sequências das confecções dos corpos-de-prova, método de dosagem Marshall.

- tomar o teor de CAP que dá a máxima estabilidade Marshall (B_1);
- tomar o teor de CAP que dá a densidade máxima teórica (B_2);

- tomar o teor de CAP que dá a média do intervalo especificado para os vazios não preenchidos $[V (\%) = (3+5)/2 = 4\%]$ (B_3);
- tomar o teor de CAP que dá a média do intervalo especificado para os vazios preenchidos $[R.B.V (\%) = (75+85)/2 = 80\%]$ (B_4).

Calcular a média dos quatro valores de B obtidos:

$$B = (B_1 + B_2 + B_3 + B_4) / 4$$

$$B = \sum_{i=1}^4 (B_i/4)$$

Verifica-se o valor B encontrado que satisfaz às duas condições:

- estabilidade Marshall acima do mínimo especificado;
- fluência abaixo do máximo especificado.

Satisfazendo essas duas condições finais, o teor B pode ser considerado o teor ótimo de CAP – B (%), em peso. Se esse teor médio não satisfizer às duas condições finais, estabilidade e fluência, podem-se fazer alguns pequenos ajustes na porcentagem de CAP e/ou na granulometria do agregado, visando obter um teor que atenda às exigências da norma ES – 031/06 do DNIT, (Pavimento flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço)

Os parâmetros para a dosagem de um material asfáltico reciclado são os mesmos para misturas asfálticas novas (Bonfim, 2007). A Tabela 5 mostra o ajuste do percentual em massa dos agregados do RFPA, em função do teor de CAP, notando-se que já existia um percentual de 3,5% de CAP no resíduo fresado.

Tabela 5- Ajuste do percentual em massa dos agregados em função do teor de CAP, traço RFA.

Teor de asfalto %	3,5	3,5 + 0,5	3,5 + 1,0	3,5 + 1,5	3,5 + 2,0	3,5 + 2,5
RFA	50,00	49,75	49,50	49,25	49,00	48,75
Seixo	48,00	47,76	47,52	47,28	47,04	46,80
Filler	2,00	1,99	1,98	1,97	1,96	1,95

4.3 Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos realizados no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ foram os de resistência à tração (RT), módulo de resiliência (MR) e fadiga (EF), realizados em equipamentos por compressão diametral, em 24 amostras. A figura 78 apresenta os corpos-de-prova já catalogados e prontos para os ensaios.

De modo individual, foram três CPs para resistência à tração, três CPs para módulo de resiliência e nove CPs para fadiga, para cada uma das misturas (traço padrão e traço RFA).



Figura 78 - Corpos de prova catalogados, prontos para os ensaios de MR e RT.

4.3.1 Módulo de Resiliência de misturas asfáltica

O ensaio de módulo de resiliência (MR) de misturas asfálticas é realizado em temperatura de 25 °C, aplicando-se cargas repetidas, num intervalo de 0,1s e repouso de 0,9s, no plano diametral vertical dos corpos-de-prova cilíndricos. Essa carga gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga e sensores LVDT medem o deslocamento diametral recuperável, na direção correspondente à tensão gerada (deslocamento horizontal).

Essa aplicação de carga simula o efeito do tráfego, que aplica cargas transientes provenientes do movimento dos veículos.

O equipamento é composto de um sistema pneumático de carregamento, uma câmara para controle de temperatura, um sistema de medição de deformação da amostra, um *software* para aquisição e análise de dados e uma estrutura de suporte e alinhamento do corpo de prova.

O programa do equipamento de cargas repetidas do Laboratório da COPPE realiza o cálculo automático do módulo de resiliência, e o resultado final é expresso pela média aritmética entre os valores obtidos nos três ciclos.

O valor do módulo de resiliência é dado por:

$$MR = \frac{F}{\Delta \cdot H} * (0.9976\mu + 0.2692) \quad \text{eq. (2)}$$

Onde:

F = Carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo-de-prova;

Δ = Deformação elástica ou resiliente;

H = Altura do corpo de prova;

μ = Coeficiente de Poisson.

Na presente pesquisa, foi utilizado o procedimento de ensaio padrão do Laboratório de Geotecnia da COPPE, conforme apresenta a Figura 79, que se baseia na norma DNIT 135/2010, utilizando o equipamento triaxial de carga repetida, aplicando vários níveis de carga, todas bem abaixo da resistência à tração do material. Considera-se como sendo o MR da mistura, a média desses valores, obtidos para um conjunto de no mínimo três corpos de prova por mistura estudada.

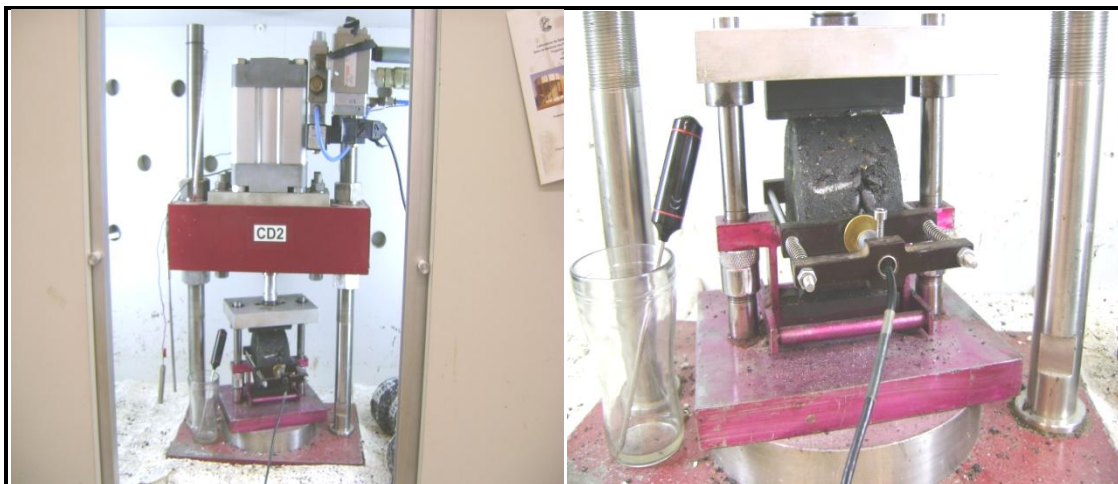


Figura 79 - Equipamentos triaxiais de carga repetida de MR, ensaio realizado na COPPE/UFRJ.

4.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral (ou tração indireta) foi concebido em 1943 por Fernando Luiz Lobo Carneiro, quando da abertura da avenida Presidente Vargas, na cidade do Rio de Janeiro, sendo que neste local existia a igreja de São Pedro, situada bem ao centro da futura avenida. Como solução imaginada à época, pensou-se em deslocá-la por meio de rolos de concreto. Na Europa havia relatos do transporte de construções sobre rolos de aço. Ensaando rolos de concreto, o engenheiro Lobo Carneiro notou que rompiam através de uma fissura vertical, e estudando este comportamento, propôs novo método para determinação da resistência à tração dos concretos (Pinto, 1991).

Pinto (1991) relata que este ensaio de tração por compressão diametral é conhecido internacionalmente como “Ensaio Brasileiro”. Originalmente desenvolvido para determinar a resistência à tração de concreto-cimento, passou também a ter finalidade similar em misturas asfálticas. O carregamento por compressão diametral pode ser utilizado para determinar, além da resistência à tração, o módulo de resiliência e a vida de fadiga das misturas.

Esse ensaio, normalizado pelo DNER – ME 138/94 e ABNT NBR – 15087, é realizado em prensa Marshall convencional, onde se posiciona o corpo de prova inserido em um dispositivo com dois frisos metálicos. Os frisos se apoiam nas duas geratrizes opostas do corpo de prova. O ensaio foi realizado à temperatura de 25 °C, com velocidade de avanço da prensa de 0,8 mm/s. Com o valor da carga de ruptura (F) já corrigida pela constante da prensa, é calculada a resistência à tração estática, por compressão diametral, através da Equação 2. Na Figura 78 apresenta-se o equipamento da COPPE de resistência à tração estática usado neste estudo.

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad \text{eq. (3)}$$

Onde:

- σ_R : Resistência à tração estática (MPa);
- F: Carga de ruptura (N);
- D: Diâmetro do corpo de prova (mm);
- H: Espessura do corpo de prova (mm).

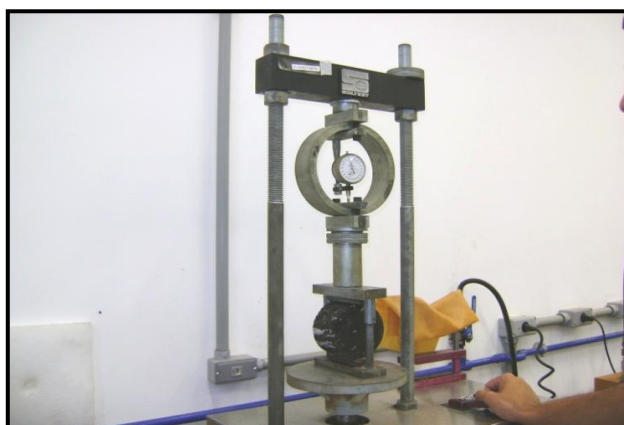


Figura 80 - Prensa mecânica para ensaio compressão diametral.

4.3.3 Ensaio de fadiga por compressão diametral

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da COPPE, sob tensão controlada e temperatura de $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Foi utilizada uma frequência de 60 aplicações de carga por minuto, com 0,10 segundo de duração de carregamento.

O ensaio de compressão diametral para fadiga de misturas asfálticas é um ensaio de tração indireta, conduzido com cargas repetidas aplicadas diametralmente em um corpo de prova cilíndrico. Estas cargas são de compressão, aplicadas em dois frisos de carga opostos, que produz tensão de tração relativamente uniforme ao longo do plano diametral vertical, sendo a ruptura do corpo-de-prova caracterizada por seccionamento ao longo deste plano (PINTO *et al.*, 1991).

O pavimento está sujeito a cargas que atuam em curto intervalo de tempo quando os veículos trafegam sobre o mesmo e, em consequência, há perda progressiva da rigidez do material levando a pequenas degradações e a fadiga do mesmo. A fadiga pode ser definida como o fenômeno que ocorre quando cargas cíclicas produzem a ruptura nos materiais com carga menores que dos ensaios com cargas estáticas.

A vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos de vida de fratura ou vida de serviço. A primeira se refere ao número total de aplicações de certa carga necessária para ocorrer à fratura completa da amostra. A vida de serviço se refere ao número total de aplicações dessa mesma carga que reduza o desempenho ou a rigidez da amostra a um nível preestabelecido (BERNUCCI *et al.*, 2007). Existem diversos ensaios para analisar a fadiga de um determinado material, tendo sido utilizado nesta pesquisa o ensaio de fadiga por compressão diametral de cargas repetidas, a tensão controlada.

A vida de fadiga pode ser expressa por diversas expressões que indicam o N, número de solicitação de carga, em termos das tensões ou das deformações iniciais, sendo k e n os parâmetros de fadiga determinados nos ensaios. Na Figura 81 está esquematizado esse ensaio,

mostrando os frisos de aplicação de carga e o plano de ruptura. A figura 82 mostra o ensaio sendo realizado.

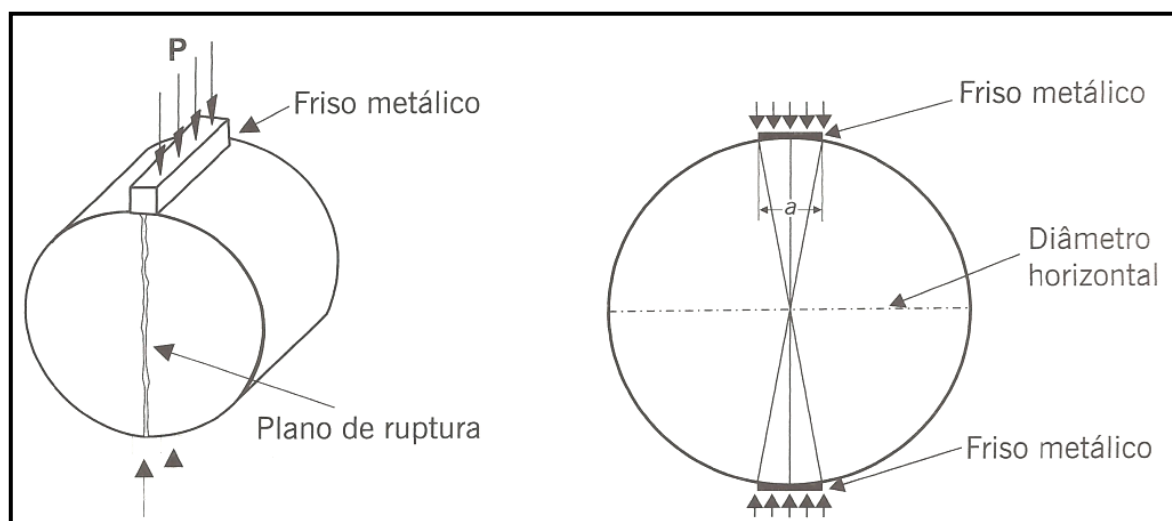


Figura 81- Esquema do ensaio de fadiga por compressão diametral (SANTOS, 2005).



Figura 82 - Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral.

Dentre as formas de representação usuais destacam-se as expressões seguintes:

$$N = k1 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^{n1} \quad \text{ou} \quad N = k2 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n2} \quad \text{eq. (4)}$$

Onde:

σ_t = resistência á tração;

$\Delta\sigma$ = diferença de tensões (compressão - tração).

4.3.4 Ligantes asfálticos

4.3.4.1 Generalidades

O asfalto é uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo. Podem ser extraídos da natureza em lagos naturais, rochas asfálticas ou por processo de refino do petróleo. São comumente utilizados em serviços de impermeabilização e juntamente com agregados para a produção de misturas asfálticas.

O cimento asfáltico de petróleo - CAP, como é conhecido no Brasil – é um produto: semi-sólido a temperatura baixa, viscoelástico na temperatura ambiente e líquido em temperatura alta; comporta-se como fluido newtoniano em temperaturas com valores próximos a 100°C e como pseudoplástico em temperaturas entre 25°C e 60°C (LEITE, 1999).

O manuseio e estocagem do asfalto devem ser feitos com a temperatura mais baixa possível, a se evitar o envelhecimento do ligante. O envelhecimento do ligante é um fenômeno que tem influência no desempenho da mistura asfáltica. A exposição do ligante às altas temperaturas e às intempéries permite a perda de voláteis e a oxidação, o que é prejudicial no que diz respeito à fadiga. Tem-se, ao longo dos anos, tentado diminuir esse efeito com adição de produtos e novas tecnologias executivas.

Quanto à deformação permanente o ligante apresenta menor resistência no início de sua vida de serviço, quando sua rigidez é menor, sendo afetado também pelas altas temperaturas e por veículos trafegando à baixa velocidade com cargas elevadas.

Os cimentos asfálticos de petróleo, conforme sua procedência são classificados como CAP - 30/45, CAP - 50/70, CAP - 85/100 e CAP - 150/200. Esta classificação é feita por meio da penetração de uma agulha padrão sob condições padronizadas (uma medida de dureza) e os números indicam a faixa de penetração, ou seja, CAP cuja dureza está entre 50 e 70 é classificado como um CAP 50/70. Além desse ensaio, o CAP deve obedecer a intervalos de valores de outros critérios para cumprir a especificação da Agência Nacional de Petróleo (ANP), como será visto.

4.3.4.2 Ensaio de caracterização do CAP

A especificação de material DNIT-EM-095/2006 adota a nova especificação de CAP que consta na Resolução N° 19/2005 da Agência Nacional de Petróleo – ANP, onde são informados os valores de vários parâmetros recomendados para que se garantam as características desejadas do asfalto. Estas são descritas brevemente a seguir:

Penetração: Ensaio onde uma agulha de peso padrão de 100g penetra, por 5s, em uma amostra de volume padrão à temperatura de 25 °C, expressa em grandeza de décimo de milímetros. As normas para a realização deste ensaio são: DNER-ME-003/99 (Materiais betuminosos - determinação da penetração), ABNT 6576 (Materiais asfálticos – Determinação da penetração) e ASTM D5 (*Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*).

A figura 83 apresenta um exemplo desse equipamento.



Figura 83 - Penetrômetro de ensaio de CAP.

Viscosidade: no Brasil o equipamento mais utilizado para determinação da viscosidade é o viscosímetro Saybolt Furol e seu procedimento está descrito nas normas: ABNT NBR 14950 (Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol) e ASTM E102 (*Standard Test Method for Saybolt Furol Viscosity of Bituminous Materials at High Temperatures*). A figura 84 apresenta um exemplo deste equipamento.



Figura 84 - Viscosímetros para ensaio de CAP Saybolt Furol.

Ponto de amolecimento: é um ensaio que fornece uma medida da temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido sob certas condições particulares e atinge uma determinada condição de escoamento. As normas ABNT NBR 6560 (Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola) e ASTM D36 (*Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*), descrevem os procedimentos do ensaio. A figura 85 apresenta um exemplo desse ensaio em andamento.

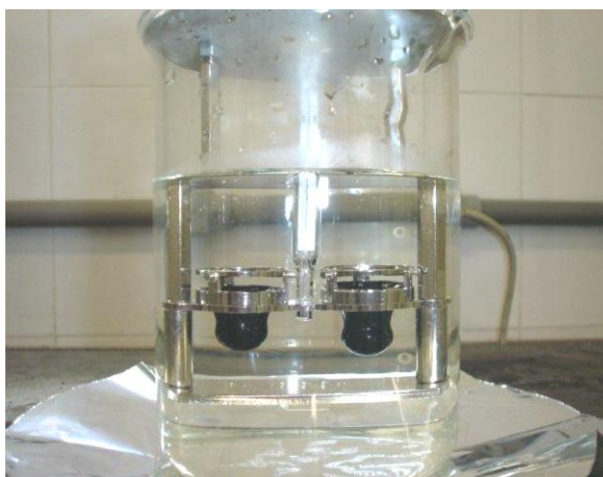


Figura 85 - Ensaio de ponto de amolecimento em execução.

Ponto de fulgor: o ensaio de ponto de fulgor está relacionado à segurança do transporte, estocagem e usinagem do ligante e fornece a menor temperatura na qual os vapores emanados durante o aquecimento se inflamam quando expostos a uma fonte de ignição. O método para o ensaio de ponto de fulgor consta nas normas: ABNT NBR 11341 (Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland) e ASTM D92 (*Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup*). A figura 86 apresenta um exemplo de um equipamento para a realização desse ensaio.



Figura 86 - Equipamento de ensaio de ponto de fulgor.

Suscetibilidade térmica: a suscetibilidade térmica indica a sensibilidade da consistência dos ligantes asfálticos à variação da temperatura. Trata-se de uma propriedade importante dos ligantes asfálticos uma vez que se eles forem muito suscetíveis a variação de estado ou de propriedades frente a variação de temperatura, não serão desejáveis na pavimentação. É desejáveis que o ligante asfáltico apresente variações pequenas de propriedades mecânicas, nas temperaturas de serviços dos revestimentos, para evitar grandes alterações de comportamento frente às variações de temperatura ambiente.

Diferentes abordagens podem ser usadas para se determinar a suscetibilidade térmica dos ligantes. Normalmente tem-se calculado para essa finalidade o índice de suscetibilidade térmica ou índice de penetração. Pelo procedimento proposto em 1936 por Pfeiffere Van Doormaal esse índice é determinado a partir do ponto de amolecimento (PA) do CAP e de sua penetração a 25°C.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será apresentada uma síntese dos resultados dos ensaios realizados durante esta pesquisa. Analisar-se-ão tais resultados, fazendo-se discussões sobre os mesmos no decorrer desta apresentação. A abordagem dos resultados seguirá a mesma sequência que foi apresentada no capítulo anterior.

Por conveniência, foram adotados símbolos para o solo de referência e suas respectivas misturas com RFA como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Simbologia do solo de referência e suas respectivas misturas com RFA.

Material/Mistura	Símbolo
Solo de referência	M1
80% Solo + 20% RFA	M2
60% Solo + 40% RFA	M3
40% Solo + 60% RFA	M4
40% Solo + 60% RFA + 2% de Cimento	M5
40% Solo + 60% RFA + 4% de Cimento	M6

5.1 Massa específica e limites de consistência do solo de referência

Os valores de limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade e massa específica do solo de referência são apresentados na tabela 7.

Tabela 7- Resultado dos ensaios de massa específica e limite de consistência do solo de referência.

Solo de referência	LL (%)	LP (%)	IP (%)	ps (g/cm³)
M1	76,5	43,16	33,35	2,68

5.1.1 Granulometria do solo de referência

A figura 87 apresenta a curva de distribuição granulométrica do solo de referência M1 analisado nessa pesquisa.

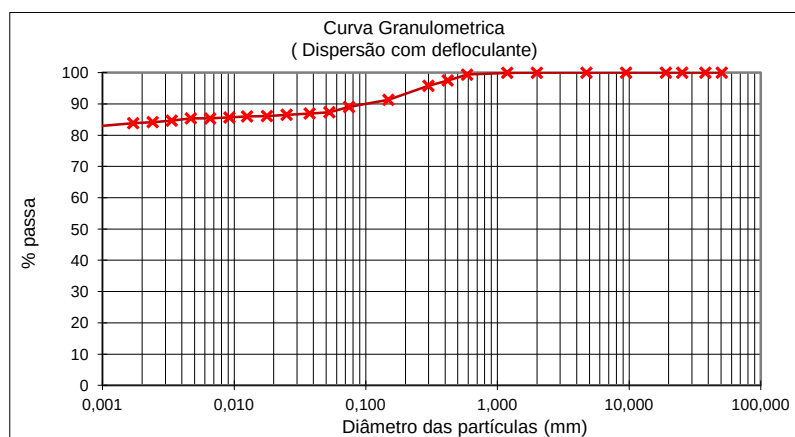


Figura 87 - Curva granulométrica do solo de referência (M1).

As composições granulométricas do solo de referência M1 são apresentadas segundo a norma NBR 6502. A Tabela 8 apresenta os resultados.

Tabela 8 - Composição granulométrica do solo de referência.

Composição granulométrica - Solo de referência								
Material	Argila (%)	Silte (%)	Areia			Pedregulho		
			Fina (%)	Média (%)	Grossa (%)	Fino (%)	Médio (%)	Grosso (%)
M1	83,08	4,81	4,96	6,59	0,56	0	0	0

Com os resultados da distribuição granulométrica das partículas e dos limites de consistência, o solo de referência foi classificado como A – 7 – 5 (solo argiloso, com mais de 35% do material passando na peneira nº 200), de acordo com o sistema de classificação TRB (*Transportation Research Board*) e como CH (argila muito plástica) pelo SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos).

Segundo o sistema TBR, usualmente utilizado na classificação dos materiais a serem empregados em aterros, subleitos, sub-bases e bases de rodovias, o solo de referência analisado possui uma baixa capacidade de suporte, com isso uma ausência de qualidade para construção das camadas do pavimento, tendo em vista se tratar de um solo predominantemente argiloso, com muita presença de finos (silte/argila).

O solo em sua formação original apresenta uma insuficiência de agregados com partículas de diâmetros maiores que 0,074 mm, tornando o solo de caráter muito argiloso, e, portanto, inadequado, economicamente, para adição de aglomerantes, em vista que um solo com uma quantidade grande de finos consome uma maior porcentagem de aglomerantes.

5.1.2 Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca Máxima do solo de referência

A figura 88 apresenta a curva de compactação na energia modificada do solo de referência.

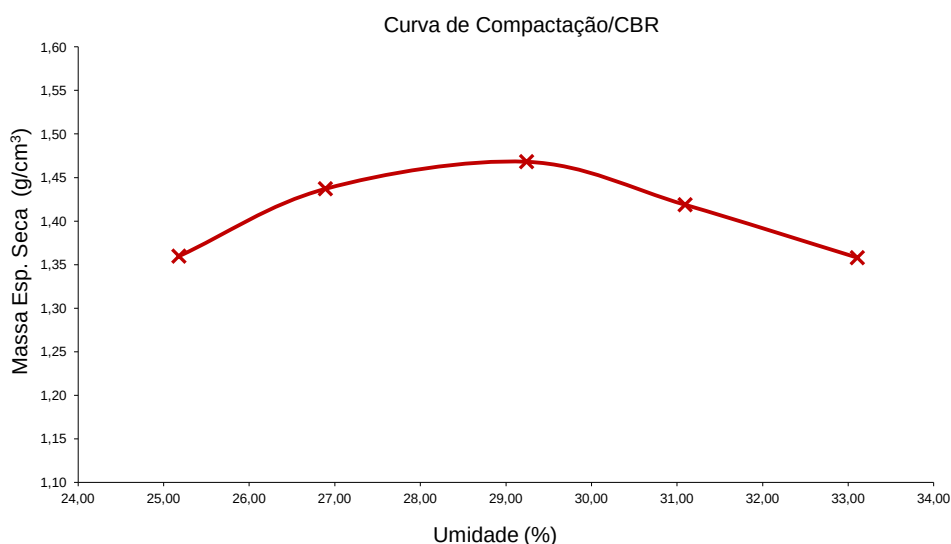


Figura 88 - Curva de compactação do solo de referência.

A Tabela 9 apresenta o resultado da umidade ótima (Wot) e massa específica aparente seca máxima do solo ($\rho_{dm\acute{a}x}$) estudadas nesta pesquisa.

Tabela 9 - Resultado da umidade ótima e massa específica aparente seca do solo.

Misturas	Wot (%)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ g/cm ³
M1	29,20	1,47

Os solos argilosos analisados separadamente são muito deformáveis, com baixa resistência ao cisalhamento, quando absorvem água. Na prática, é comum e necessário misturar esse material ao solo arenoso, ou seja, solos com características granulares e solos com características coesivas, para se obter uma mistura com propriedades ideais de resistência e trabalhabilidade (MARQUES, 2009).

5.1.3 Índice de Suporte Califórnia (ISC) do solo de referência

O Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR - *California Bearing Ratio*), padronizado no Brasil pela Norma DNER-ME 049/94, na energia modificada apresentou os seguintes resultados como mostra a tabela 10.

Tabela 10- Valores da Expansão e ISC do solo de referência.

Misturas	Expansão (%)	ISC (%)
M1	0,10	11

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) estabelece os parâmetros de aceitação para os materiais utilizados nas camadas de base de pavimentos rodoviários na energia modificada. A tabela 11 apresenta os principais parâmetros para os materiais de base conforme as especificações de serviço do DNIT, ES-141/10 (Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço).

Tabela 11- Parâmetros de norma para materiais de base.
Fonte: DNIT – ES 141/10.

Parâmetro da norma	Base estabilizada granulometricamente
ISC ou CBR (para $N \leq 5 \times 10^6$)	≥ 60
ISC ou CBR (para $N > 5 \times 10^6$)	≥ 80
Expansão (%)	$\leq 0,5$

5.2 Resíduo fresado do pavimento asfáltico (RFA)

5.2.1 Análise granulométrica por peneiramento antes e após a extração do CAP do resíduo fresado do pavimento asfáltico

Para a análise granulométrica das amostras do RFA, adotou-se a relação de peneiras que compõem a faixa C, para projetos de misturas asfálticas do DNIT, que consta na norma DNIT - ES 031/06 (Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço). Foi necessário aquecer as amostras do RFA sem a extração do CAP, na estufa, por 30 minutos, a uma temperatura de 100 °C, para facilitar a separação dos grumos, antes do peneiramento. A tabela 12 apresenta os resultados.

Tabela 12 - Valores da granulometria do RFA, antes e após a extração do CAP.

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passante, em massa							
		Amostra 01		Amostra 02		Amostra 03		Média	
mm	pol. ou nº	Nat	Após .ext	Nat	Após .ext	Nat	Após .ext	Nat	Após .ext
19,1	3/4"	100	100	100	100	100	100	100	100
12,7	1/2"	95,83	100	96,48	100	96,1	100	96,14	100,0
9,5	3/8"	91,23	99,28	91,61	97,70	91,63	95,93	91,49	97,64
4,76	nº 4	74,86	94,43	77,65	90,82	75,94	82,92	76,15	89,39
2,00	nº 10	58,16	84,13	61,28	81,13	59,28	72,12	59,57	79,13
0,42	nº 40	20,93	50,91	20,64	47,97	22	37,04	21,19	45,31
0,18	nº 80	6,00	24,67	3,78	20,59	7,34	12,65	5,71	19,30
0,075	nº 200	2,92	11,58	0,56	9,37	3,67	8,81	2,38	7,59

Notou-se que, mesmo aquecendo os grumos na estufa por 30 minutos, a uma temperatura de 100 °C, antes do peneiramento, sem a adição do solvente para retirar o CAP, não se obtinha uma quantidade considerável de material menor que 2,00 mm.

Quando o material fresado é analisado sem a extração de CAP, observa-se o acréscimo da fração grossa, ocasionado pela formação de grumos devido à ação do ligante (material asfáltico). Porém, os grumos, possivelmente, não vão possuir a mesma resistência mecânica do agregado original do pavimento, pois podem ser fracionados durante o processo de mistura e compactação.

5.4 Solo de referência estabilizado com RFA

5.4.1 Massa específica e limites de consistência das misturas com RFA

Os valores de limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade e massa específica das misturas M2, M3, M4, M5 e M6 são apresentados na tabela 13.

Observa-se que, ao aumentar a porcentagem de material fresado, os limites de consistência, e, portanto, os índices de plasticidade diminuem, pelo efeito do tamanho fictício do grumo do material fresado.

Tabela 13 - Resultado dos ensaios de massa específica e limite de consistência das misturas com o RFA.

Misturas	LL (%)	LP (%)	IP (%)	ρ_s (g/cm ³)
M2	61,1	38,16	22,94	2,61
M3	52,9	33,33	19,58	2,60
M4	36,63	26,00	10,63	2,53
M5	27,75	21,2	6,55	2,45
M6	27,1	21,62	5,48	2,39

5.4.2 Granulometria das misturas do solo referência com RFA

As figuras 89 a 93 apresentam as curvas de distribuição granulométrica das misturas M2, M3, M4, M5 e M6. A figura 94 apresenta as curvas granulométricas conjuntas do solo de referência com as misturas, analisado nessa pesquisa.

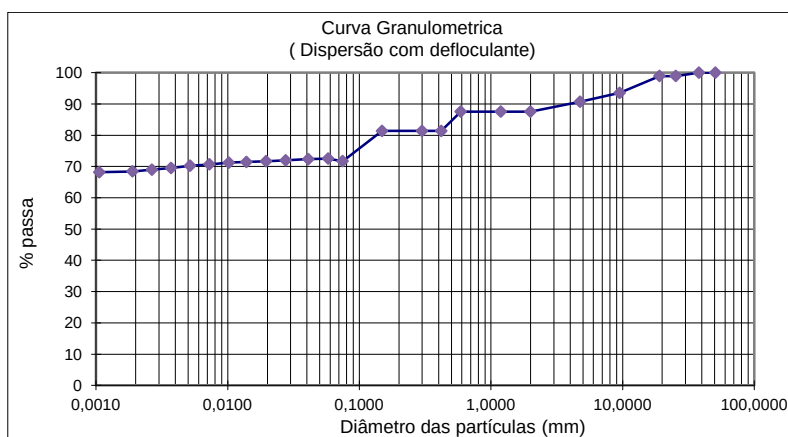


Figura 89 - Curva granulométrica da mistura (M2).

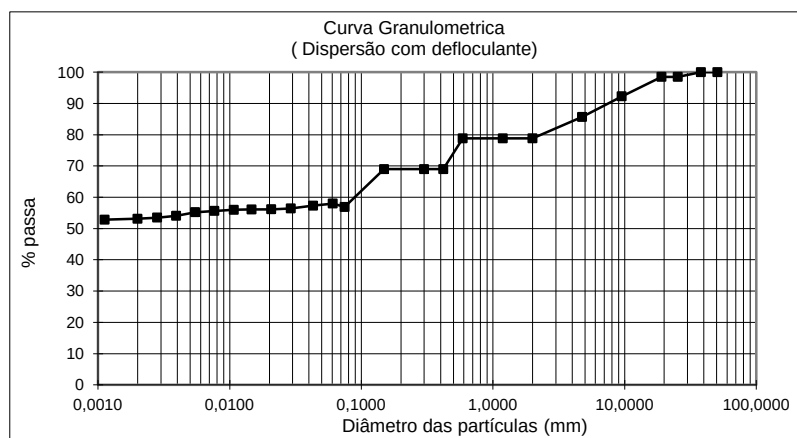


Figura 90 - Curva granulométrica da mistura (M3).

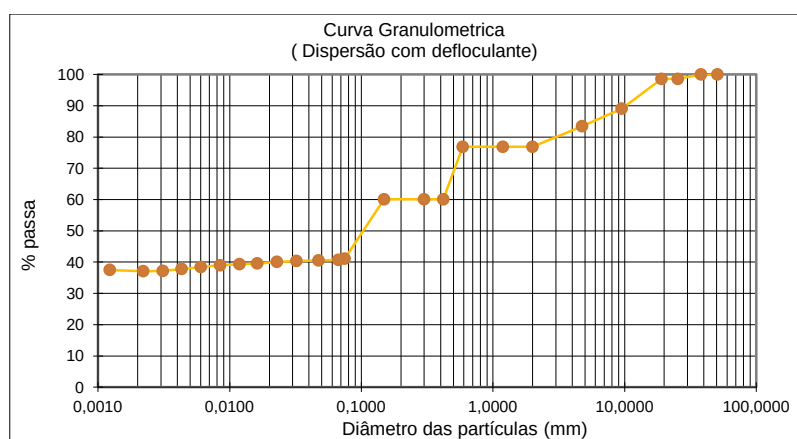


Figura 91 - Curva granulométrica da mistura (M4)

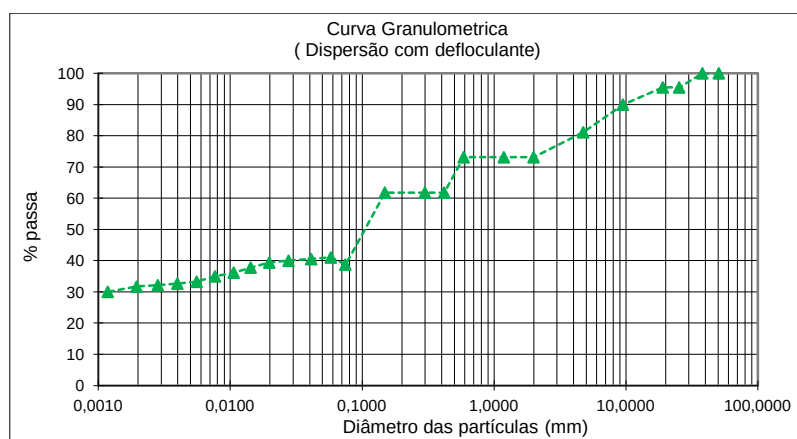


Figura 92 - Curva granulométrica da mistura (M5)

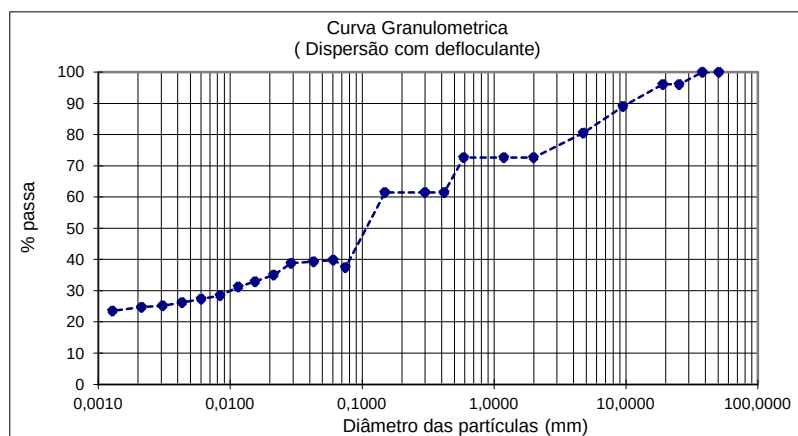


Figura 93 - Curva granulométrica da mistura (M6)

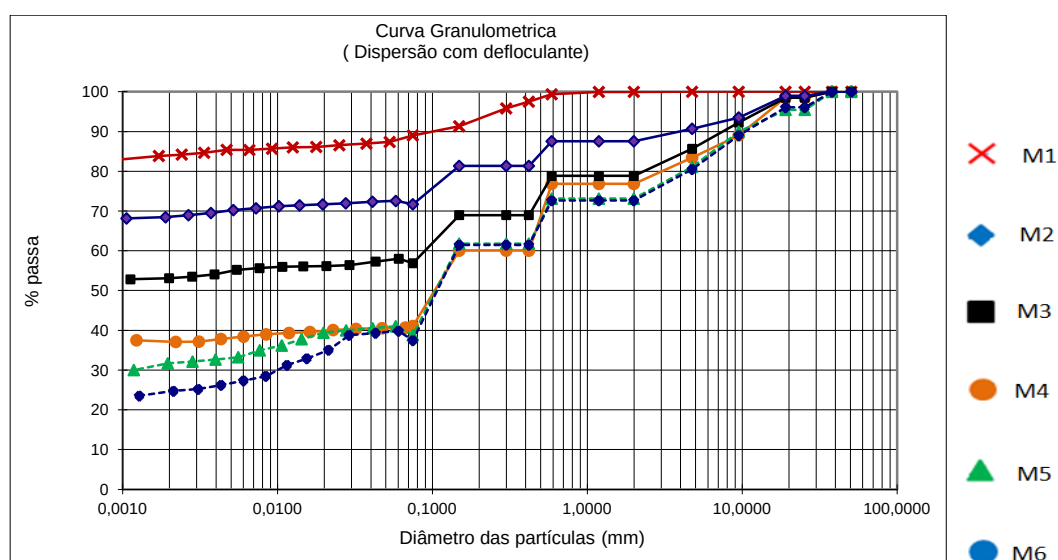


Figura 94 - Curvas granulométricas conjuntas do solo de referência com as misturas.

As composições granulométricas das mistura M2, M3, M4, M5 e M6 são apresentadas segundo a norma NBR 6502. A Tabela 14 mostra os resultados.

Tabela 14 - Composição granulométrica das misturas com o RFA.

Composição granulométrica - Misturas do solo de referência com RFA								
Material	Argila (%)	Silte (%)	Areia			Pedregulho		
			Fina (%)	Média (%)	Grossa (%)	Fino (%)	Médio (%)	Grosso (%)
M2	68,29	4,88	9,23	5,96	0,01	4,25	6,65	1,10
M3	52,64	3,77	12,1	10,33	0	8,7	11,5	2,15
M4	36,22	3,66	19,6	17,2	0	8,5	12,4	3,40
M5	31,7	7,82	22,28	12	0	10,3	12	4,50
M6	24,66	13,66	23,16	11,82	0	10,1	13,3	3,90

Observa-se que, ao aumentar a porcentagem de material fresado, a fração pedregulho e areia aumentaram, enquanto a fração de silte e argila diminuíram.

5.4.3 Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca Máxima das misturas com RFA

As figuras 95 a 99 apresentam as curvas de compactação na energia modificada das misturas M2, M3, M4, M5 e M6. A figura 100 apresenta as curvas compactação conjunta do solo de referência com as misturas, analisado nessa pesquisa.

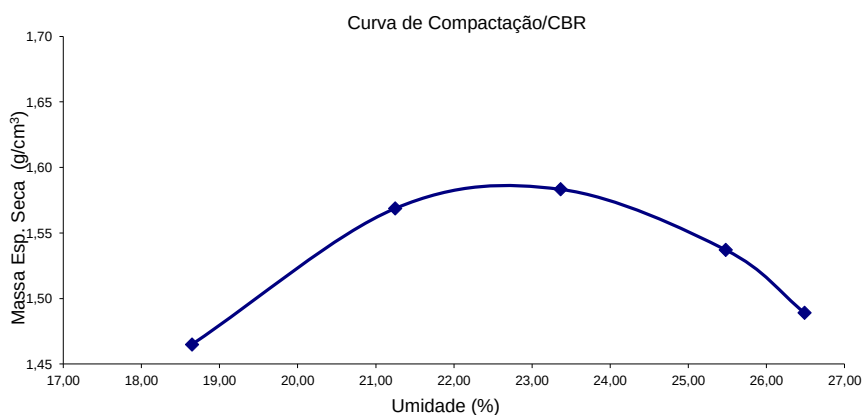


Figura 95 - Curva de compactação da mistura M2.

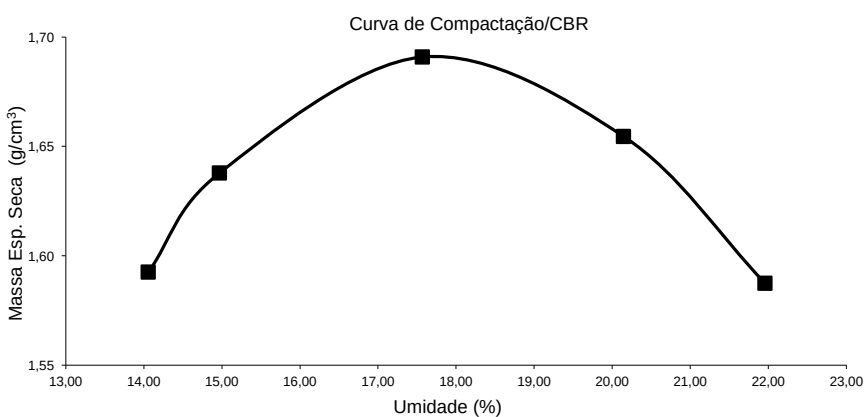


Figura 96 - Curva de compactação da mistura M3.

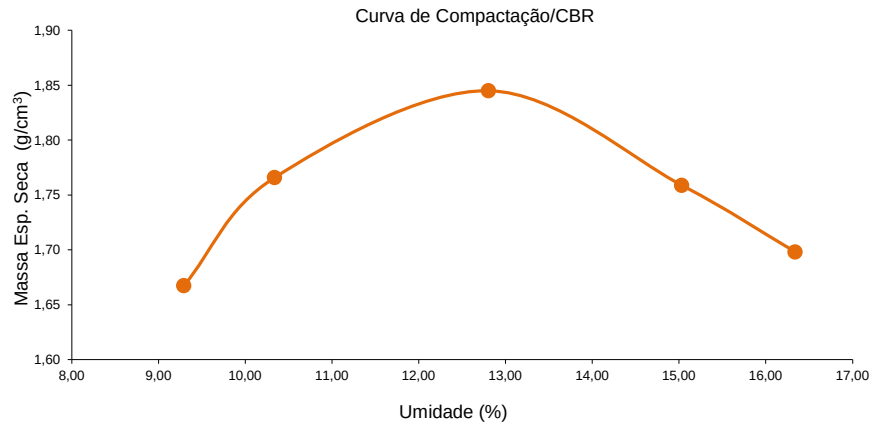


Figura 97 - Curva de compactação da mistura M4.

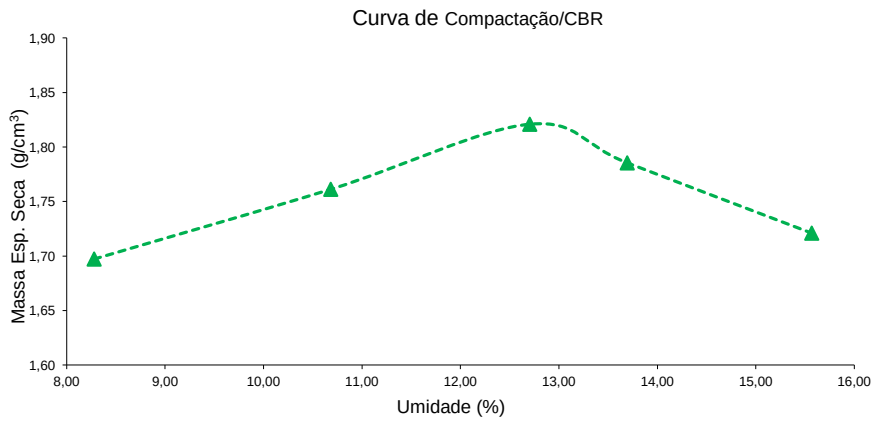


Figura 98 - Curva de compactação da mistura M5.

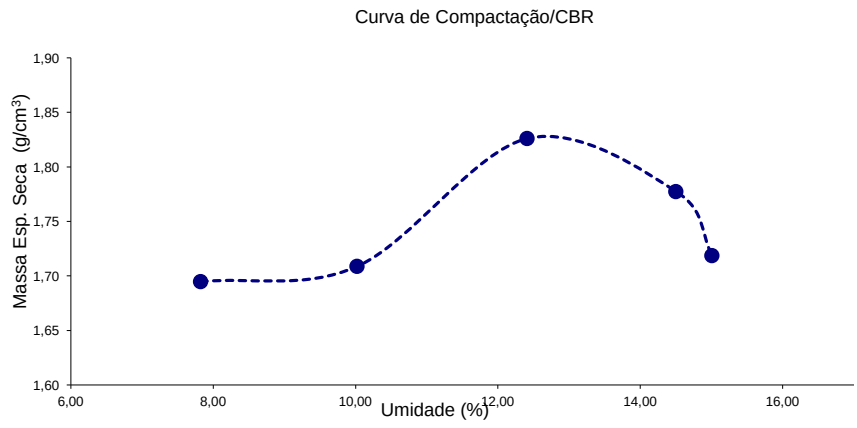


Figura 99 - Curva de compactação da mistura M6.

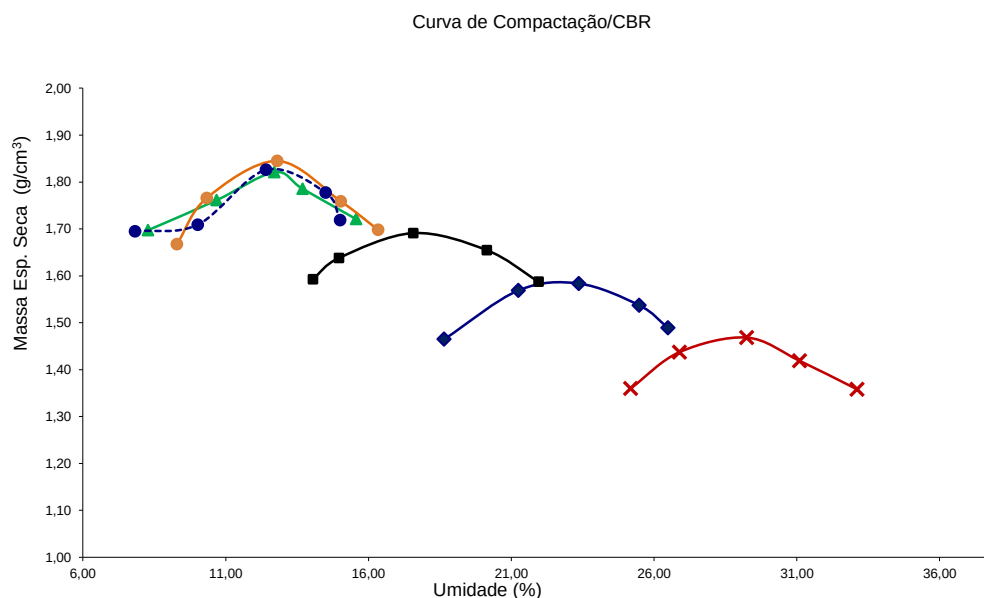


Figura 100 - Curva de compactação conjuntas do solo de referência com as misturas.

As curvas de compactação mostram que, à medida que se acrescentou uma maior quantidade de material fresado em cada mistura, a umidade ótima diminuiu e a massa específica aumentou, visto que a sua composição contém seixo, areia, filler e CAP envolvidos nesses agregados, ocorrendo uma estabilização granulométrica do solo de referência. Uma vez que o solo em sua formação original apresenta uma insuficiência de agregados com partículas de diâmetros maiores que 0,074 mm, tornando o solo de caráter muito argiloso, e, portanto inadequado economicamente para adição de aglomerantes, a estabilização granulométrica com o RFA tornou-se mais viável, do ponto de vista técnico e econômico.

Pode-se perceber em M4, M5 e M6, que a massa específica aparente seca ($\rho_{dm\acute{a}x}$) varia muito pouco, em relação à umidade ótima (W_{ot}) presente no material; durante o ensaio, pode-se notar que as misturas apresentam bastante dificuldade para absorver água. Esse fato deve-se à maior quantidade de material fresado presente nas misturas, além disso, o material fresado encontra-se recoberto por ligante asfáltico, o que dificulta a absorção de água pelo material. O material apresenta um comportamento típico dos materiais granulares ditos

abertos, aqueles com insuficiência de materiais finos, onde não há definição do ramo seco e do ramo úmido na curva de compactação.

A Tabela 15 apresenta o resultado da umidade ótima (Wot) e massa específica aparente seca máxima do solo ($\rho_{dm\acute{a}x}$) e suas misturas estudadas nesta pesquisa.

Tabela 15 - Resultado da umidade ótima e massa específica aparente seca das misturas com RFA.

Misturas	Wot (%)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)
M2	22,8	1,59
M3	17,8	1,69
M4	12,8	1,85
M5	12,7	1,82
M6	12,4	1,83

O material fresado tem características semelhantes ao solo arenosos e, de um modo geral, facilmente destruído por ações abrasivas, quando analisados separadamente. Já os solos argilosos, também analisados separadamente, são muito deformáveis, com baixa resistência ao cisalhamento, quando absorvem água. Na prática, é comum e necessário a mistura desses dois tipos de materiais, ou seja, solos com características granulares e solos com características coesivas, para se obter uma mistura com propriedades ideais de resistência e trabalhabilidade (MARQUES, 2009).

5.4.4 Índice de Suporte Califórnia (ISC) das misturas com RFA

O Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR - *California Bearing Ratio*), padronizado no Brasil pela Norma DNER-ME 049/94, na energia modificada, apresentou os seguintes resultados como mostra a tabela 16.

Tabela 16 - Valores da Expansão e ISC das misturas com RFA após 96 horas.

Misturas	Expansão (%)	ISC (%)
M2	0,12	24
M3	0,15	28
M4	0,19	37
M5	0,12	145
M6	0,10	163

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) estabelece os parâmetros de aceitação para os materiais utilizados nas camadas de base de pavimentos rodoviários na energia modificada. A tabela 17 apresenta os principais parâmetros para os materiais de base conforme as especificações de serviço do DNIT, ES-141/10 (Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente), e ES-142/10 (Pavimentação - Base de solo melhorado com cimento).

Tabela 17 - Parâmetros de norma para materiais de base.

Fonte: DNIT - ES 141/10 e DNIT – ES 142/10.

Parâmetro da norma	Base estabilizada granulometricamente	Base de solo melhorado com cimento
ISC ou CBR (para $N \leq 5 \times 10^6$)	≥ 60	≥ 80
ISC ou CBR (para $N > 5 \times 10^6$)	≥ 80	≥ 80
Expansão (%)	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$
Limite de liquidez - LL (%)	≤ 25	≤ 25
LL para fração que passa na peneira nº 40 (%)		≤ 40
IP para fração que passa na peneira nº 40 (%)		≤ 18
Composição granulométrica dentro de uma das faixas estabelecida na própria norma	sim	sim
Fração retida na peneira nº 10, que deve ser constituída de partículas duras e isentas de substâncias prejudiciais.	sim	sim

Os valores encontrados para o ISC das misturas (Solo/RFA) podem ser considerados baixos, no entanto, são aceitáveis, se esses materiais forem utilizados em bases e/ou sub-bases de vias de rolamento de tráfego leves e médios; a expansão menor 0,5% está dentro do aceitável, entretanto, a mistura M5 e M6 foi melhorada com acréscimos de 2% e 4% de cimento Portland CP II-Z-32, respectivamente, onde se obteve um ganho significativo nos resultados encontrados, ficando seus usos dentro dos limites para a confecção de bases de vias com maior tráfego de veículos. A adição de 2% de cimento na mistura M5 foi responsável pelo aumento de 4 (quatro) vezes o valor de ISC em relação aos resultados encontrados nos ensaios com o solo de referência M1, contudo a adição de 4% de cimento na mistura M6 não alcançou valores significativos em relação aos resultados encontrados na mistura M5, que se mostrou mais econômica.

5.4.5 Resistência à compressão simples do solo de referência e das misturas com resíduo fresado do pavimento asfáltico

Verificou-se que as misturas que apresentaram melhores resultados foram as M5 e M6 (40% solo com 60% de RFA, com acréscimo de 2% e 4% de cimento, respectivamente) como forma de melhorar sua resistência, obedecendo a um tempo de cura de 14 dias. Os resultados foram bastante positivos, alcançando uma resistência maior que 2,1 MPa ao passo que a norma ABNT NBR 12253 (Solo-cimento - Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento) recomenda uma resistência maior ou igual a 2,1 MPa, com uma quantidade de cimento maior ou igual a 5% e, com 2% de cimento, esse resultado foi alcançado com êxito na mistura M5. A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 18 - Resultado dos ensaios de resistência à compressão simples.

Resistência à Compressão Simples - Energia Modificada				
Misturas	1	2	3	Média (kPa)
M1	877	959	908	915
M2	1146	1099	1226	1157
M3	1339	1394	1174	1302
M4	1317	1498	1364	1394
M5	2358	2228	2306	2297
M6	2513	2500	2306	2440

5.4.6 Determinação do Módulo de Resiliência do solo de referência e das misturas com resíduo fresado do pavimento asfáltico

Os resultados de MR demonstram que a presença do RFA em suas respectivas porcentagens representou um ganho expressivo de melhoria, quanto à deformabilidade do solo, podendo tal comportamento ser justificado por uma estabilização granulométrica do solo com adição do RFA. Tanto o solo de referência quanto as misturas apresentaram comportamento resiliente dependente da tensão confinante σ_3 , como esperado, no caso de solos argilosos estabilizados granulometricamente, contribuindo para o aumento da coesão e diminuindo a distribuição desse material para a deformabilidade total do pavimento.

Percebe-se um ganho de qualidade com a presença do RFA, deixando o solo menos deformável elasticamente. Na Figura 101 observam-se o comportamento do MR, em forma gráfica, de todas as misturas produzidas em laboratório. A tabela 19 apresenta os resultados, cujos ensaios foram realizados conforme apresentado no item 4.2.8. As misturas M5 e M6 obedeceram a um tempo de cura de 24 dias, os valores do MR admitidos nesta pesquisa é a média dos valores de três resultados de cada mistura,

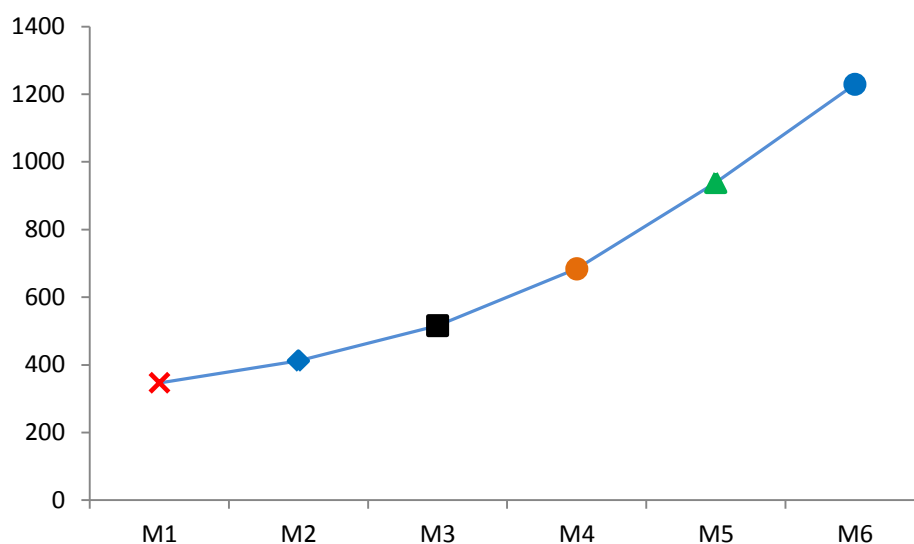


Figura 101 - Gráfico dos ensaios do MR das misturas.

Tabela 19 - Resultados dos ensaios do MR.

Módulo de Resiliência (MPa)					
M1	M2	M3	M4	M5	M6
347	412	516	684	939	1229

Para facilitar a análise comparativa entre solo de referência “versus” misturas de solo/RFA, baseados nos valores obtidos de ensaios triaxiais de laboratório mostrados na figura 93, pode-se trabalhar com a média geral desses valores por tipo de mistura, ou seja:

$$\text{MR da mistura M1} = (302,67 + 314,06 + 424,44) / 3 = \underline{347 \text{ MPa}}$$

$$\text{MR da mistura M4} = (582,56 + 552,33 + 916,53) / 3 = \underline{684 \text{ MPa}}$$

$$\text{MR da mistura M6} = (1007,72 + 1488,17 + 1190,39) / 3 = \underline{1229 \text{ MPa}}$$

A título de comparação, citam-se na Tabela 20 valores de W_{ot} , $\rho_{dm\acute{a}x}$, $\rho_{dm\acute{a}x}$, ISC e MR de vários autores, obtidos por alguns dos trabalhos consultados nesta pesquisa. Pode-se

notar que a ordem de grandeza dos resultados para misturas com RFA estão na mesma ordem de grandeza dos obtidos neste trabalho com diferentes tipos de materiais.

Tabela 20 - valores de Wot, $\rho_{dm\acute{a}x}$, $\rho_{dm\acute{a}x}$, ISC e MR de diversos autores, para misturas de solo.

Referência	Material	Mistura	Wot (%)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	ISC (%)	MR (MPa)
Vizcarra (2010)	Cinzas de (RSU) Resíduo Sólido Urbano	Mistura 01	18,50	1,718	2,00	185
		Mistura 03	22,50	1,555	33,00	181
		Mistura 05	16,00	1,622	8,00	112
Oliveira (2011)	Saibro + 3% Cimento, Saibro + 5% Cimento	CP1	4,00	1,682	33	2865
		CP2	8,90	1,820	77	2350
Lopes (2011)	Solo - Cinza de Carvão Mineral	S70/CF27/C3	16,8	1,598		1087
		S80/CV17/C3	12,9	1,835		1303

5.5 Mistura asfáltica

5.5.1 Determinação do Teor de CAP contido no resíduo fresado do pavimento asfáltico

O ensaio realizado para obtenção do teor de CAP do material fresado foi executado segundo preconiza a norma DNIT-ME 053-94 (Misturas betuminosas - percentagem de betume), utilizando-se o solvente do tipo xileno.

O teor de CAP residual, obtido no material fresado foi de 3,5%, valor este compatível com o teor ótimo de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) que fica na faixa de 4,5% a 9,0% usualmente utilizado em Concretos Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ), faixa “C” do DNIT, que compõem a última camada de revestimento dos pavimentos flexíveis.

5.5.2 Composição granulométrica dos agregados graúdo e miúdo adicionados nas confecções das misturas asfálticas

5.5.2.1 Granulometria do agregado miúdo - areia

A figura 102 apresenta a curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo analisado nessa pesquisa.

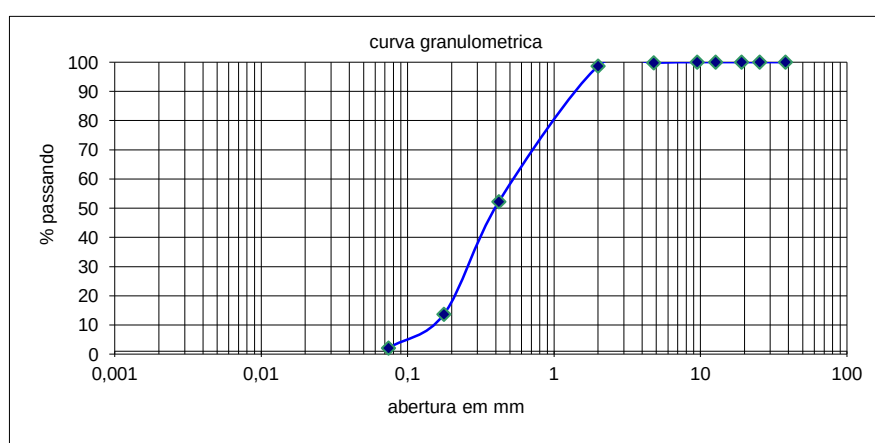


Figura 102 - Curva granulométrica do agregado miúdo – areia.

A Tabela 21 apresenta a composição granulométrica do agregado miúdo para um traço de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ).

Tabela 21 - Composição granulométrica do agregado miúdo - areia.

Granulometria do Agregado Miúdo - Areia					
Peneira	Peneira	Peso Retido	% Retido	% Acumulado	% Que Passa
2"	50,8				
1 1/2"	38,1				100
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,1	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2	12,7	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
4	4,80	2,39	0,24	0,24	99,76
10	2,00	11,22	1,12	1,36	98,64
40	0,42	465,09	46,46	47,82	52,18
80	0,177	386,06	38,56	86,38	13,62
200	0,074	115,75	11,56	97,94	2,06

5.5.2.2 Granulometria do agregado graúdo – seixo

A figura 103 apresenta a curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo analisado nessa pesquisa.

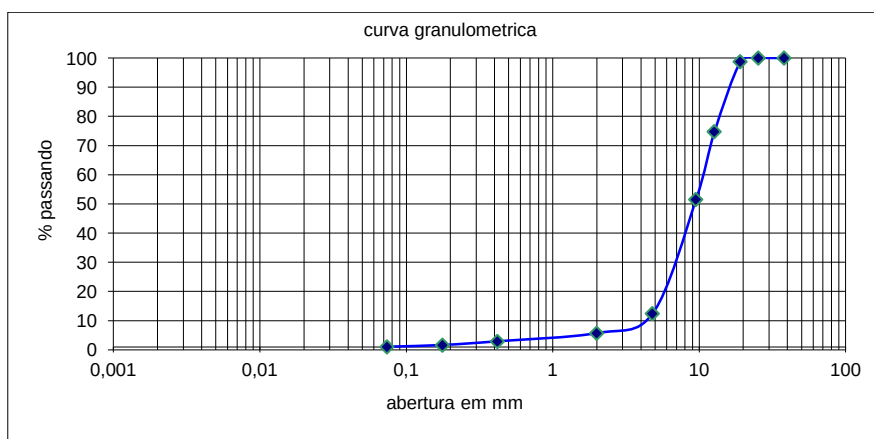


Figura 103 - Curva granulométrica do agregado graúdo - seixo.

A Tabela 22 apresenta a composição granulométrica do agregado graúdo para um traço de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ).

Tabela 22 - Composição granulométrica do agregado graúdo - seixo.

Granulometria do Agregado Graúdo - Seixo					
Peneira	Peneira	Peso Retido	% Retido	% Acumulado	% Que Passa
2"	50,8				
1 1/2"	38,1				100
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,1	63,10	1,24	1,24	98,76
1/2"	12,7	1223,47	23,99	25,23	74,77
3/8"	9,50	1185,37	23,24	48,47	51,53
4"	4,80	1993,93	39,10	87,57	12,43
10"	2,00	343,13	6,73	94,29	5,71
40"	0,42	143,35	2,81	97,10	2,90
80"	0,177	65,02	1,27	98,38	1,62
200"	0,074	29,98	0,59	98,97	1,03

5.5.2.3 Massa específica do agregado miúdo - areia.

O procedimento para a determinação da massa específica do agregado miúdo foi executado, utilizando o frasco Chapman, segundo o método DNER – ME 194/98 (Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman). O resultado da média de três amostras foi de 2,62 g/cm³.

5.5.2.4 Determinação da massa específica real, massa específica aparente e absorção do agregado graúdo (seixo)

Os procedimentos para a determinação da massa específica real, da massa específica aparente, da massa específica saturada superfície seca e da absorção de água do agregado graúdo (seixo), na condição saturada superfície seca, estão de acordo com a norma NBR NM 53/2002 (Agregado graúdo - Determinação da massa específica real, massa específica aparente e absorção do agregado graúdo). Os resultados da média de três amostras foram as seguintes:

- Massa específica real = 2,56 g/cm³;
- Massa específica aparente = 2,51g/cm³;
- Absorção = 0,78%.

5.5.2.5 Característica do CAP 50/70

Nessa pesquisa utilizou se o CAP 50/70 puro que é um ligante proveniente da Refinaria da Petrobrás Reman, situada na cidade de Manaus - AM. A Tabela 23 mostra as principais características do CAP 50/70 dessa pesquisa.

Tabela 23 - Características do CAP 50/70 usado neste estudo.

CAP 50/70				MÉTODOS		
Caracterização	Unidade	Limites	Resultados	ABNT	DNER	ASTM
Penetração	0,1 mm	50/70	63	NBR 6576	ME 003/99	D5
	°C	46	52	NBR 6560		D 36
Viscosidade Saybolt Furol 135 °C	s	141	144	NBR 14950	ME 004/99	E 102
Viscosidade Saybolt Furol 150 °C	s	50	46	NBR 14950	ME 004/99	E 102
Viscosidade Saybolt Furol 170 °C	s	30-150	35	NBR 14950	ME 004/99	E 102
Ponto de Amolecimento	°C	60	55	NBR 6560	ME 163/98	D 113
Ponto de Fulgor, min	°C	≥ 235	315	NBR 11341	ME 149/94	D 92
Suscetibilidade Térmica, (t)1		+1,5 a 0,7	+ 1,2			

5.5.3 Ensaio Marshall

A Tabela 24 apresenta a composição granulométrica da mistura de agregados para um traço padrão de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ), na faixa C do DNIT, no intuito de reproduzir a faixa original de projeto da mistura aplicada no local da coleta das amostras antes da fresagem, que serviu como referência para o traço utilizando o RFPA. A figura 104 apresenta o enquadramento dos agregados do traço padrão do CAUQ na faixa C do DNIT.

Tabela 24 - Composição granulométrica do traço padrão do CAUQ na faixa C do DNIT.

Peneira	Brita 2	Seixo	Brita 0	Pó	Areia	Filer	Mistura	Faixa
nº	mm	% pass.	% pass. 0,58	% pass.	% pass.	% pass. 0,37	% pass. 0,05	C
1"	25,4		100			100		
3/4"	19,1		98,76	57,3		100	37	100
1/2"	12,7		74,77	43,4		100	37	80- 100
3/8"	9,5		51,53	29,9		100	37	70 - 90
4	4,8		12,43	7,21		99,76	36,91	44 - 72
10	2		5,71	3,31		98,64	36,5	22 - 50
40	0,42		2,9	1,68		52,18	19,31	8 - 26
80	0,18		1,62	0,94		13,62	5,039	4 - 16
200	0,075		1,03	0,6		2,06	0,762	2 - 10

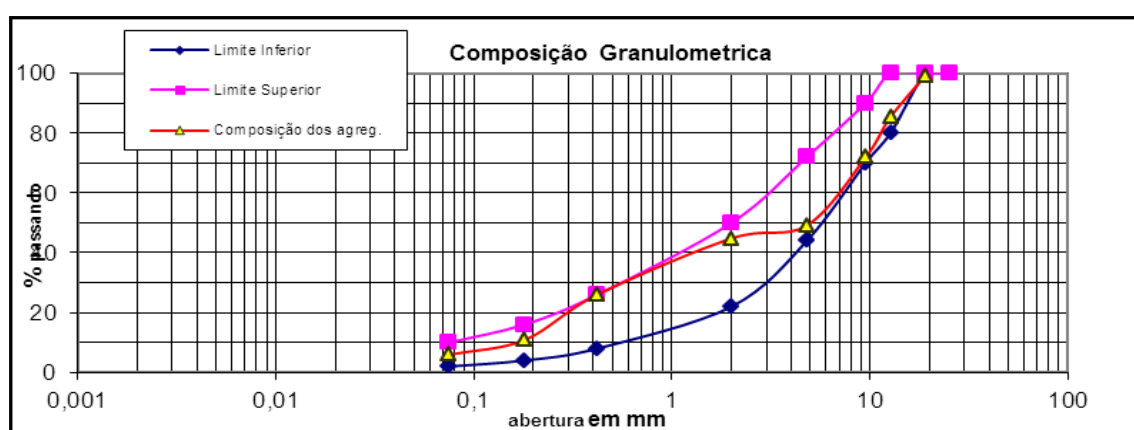


Figura 104 - Enquadramento dos agregados do traço padrão do CAUQ na faixa C do DNIT.

Após o destorroamento e peneiramento, observou-se que o resíduo do material fresado do pavimento asfáltico não atendia às especificações da faixa C do DNIT, justificando a técnica de fresagem a frio, que quebra uma fração dos agregados grãos no momento do corte. A Tabela 25 apresenta os resultados.

Tabela 25- Composição granulométrica do RFA sem a correção com agregado grão (seixo).

Peneira	Brita 2	Seixo	Seixo	Pó	Areia	Filer	Mistura	Faixa
nº	mm	% pass.	% pass. 0,48	% pass. 0,1	% pass.	% pass. 0,4	% pass. 0,02	C
1"	25,4		100			100		100
3/4"	19,1		98,76	47,4		100	40	100
1/2"	12,7		74,77	35,9		100	40	80- 100
3/8"	9,5		51,53	24,7		100	40	70 - 90
4	4,8		12,43	5,97		89,39	35,756	44 - 72
10	2		5,71	2,74		79,13	31,652	22 - 50
40	0,42		2,9	1,39		45,31	18,124	8 - 26
80	0,18		1,62	0,78		19,31	7,724	4 - 16
200	0,075		1,03	0,49		7,59	3,036	2 - 10

A figura 105 apresenta a curva granulométrica fora da faixa exigida pela norma nas peneiras referentes ao agregado graúdo, observando-se a necessidade da adição desses agregados (seixo), para uma devida correção na faixa de projeto do traço utilizando o RFA.

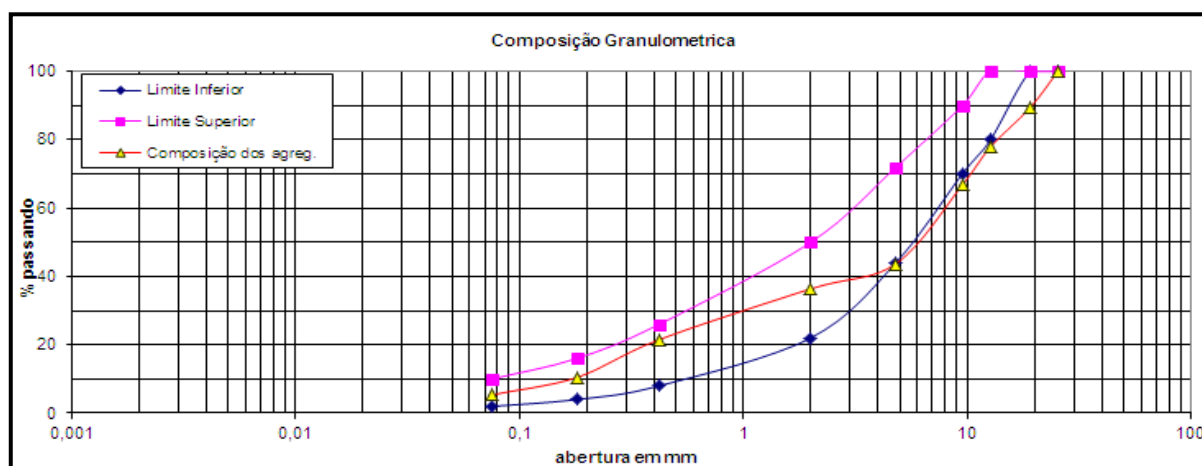


Figura 105 - A composição granulométrica do RFA não atendeu ao enquadramento da faixa C do DNIT.

Foi necessária a adição de 10% de agregado graúdo (seixo) no material fresado, satisfazendo a composição granulométrica, para que a mistura se enquadrasse na faixa de projeto. A Tabela 26 apresenta o resultado. A figura 106 apresenta o enquadramento da curva na faixa C.

Tabela 26 - Correção com agregado graúdo (seixo) da composição granulométrica do RFA.

Peneira	Brita 2	Seixo	Seixo	Pó	Areia	Filer	Mistura	Faixa
nº	mm	% pass.	% pass. 0,48	% pass. 0,1	% pass.	% pass. 0,4	% pass. 0,02	C
1"	25,4	100			100			100
3/4"	19,1	98,76	47,4	100	100	40	100	99,40
1/2"	12,7	74,77	35,9	100	100	40	100	87,89
3/8"	9,5	51,53	24,7	97,63	100	40	100	76,50
4	4,8	12,43	5,97	10,3	89,39	35,756	100	44,75
10	2	5,71	2,74		79,13	31,652	100	36,39
40	0,42	2,9	1,39		45,31	18,124	100	21,52
80	0,18	1,62	0,78		19,31	7,724	96,8	10,44
200	0,075	1,03	0,49		7,59	3,036	91,6	5,36

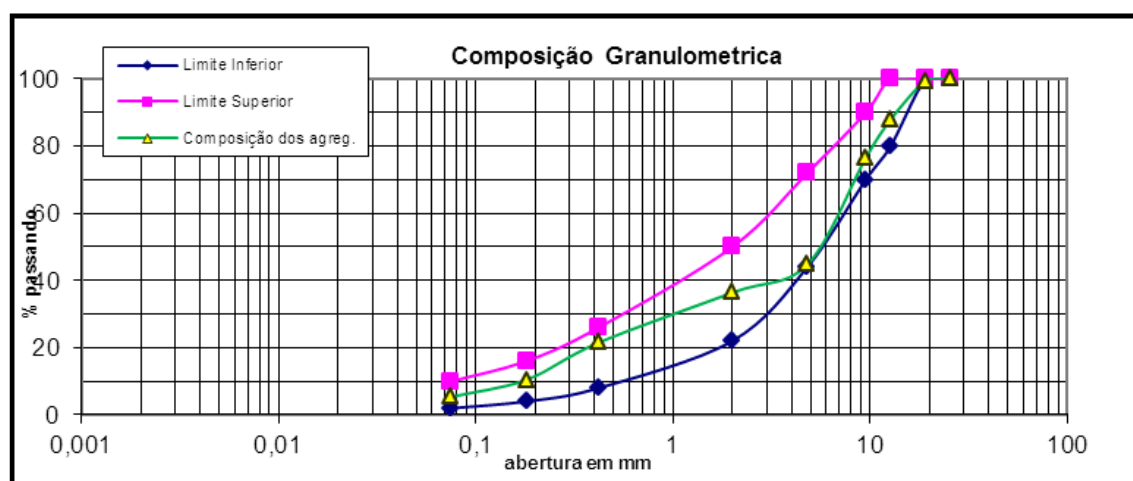


Figura 106 - Enquadramento dos agregados do traço com o RFA atendendo os parâmetros da na faixa C do DNIT.

A figura 107 apresenta o enquadramento das duas composições de agregados na faixa C, atendendo às especificações da (ES – 031/06) do DNIT.

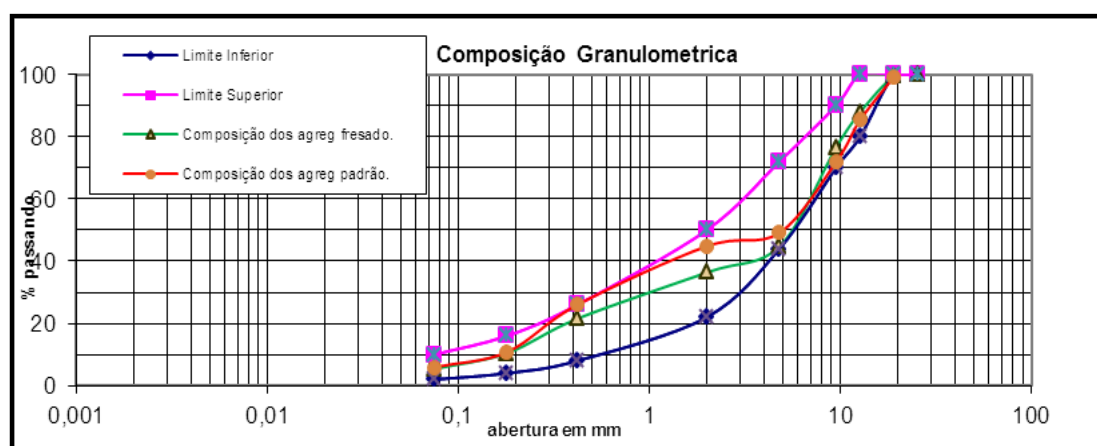


Figura 107 - Enquadramento da granulometria do traço padrão e a do traço com RFA na faixa C do DNIT.

A Tabela 27 apresenta a média dos resultados das misturas do traço padrão, conforme o método Marshall.

Tabela 27 - Média dos resultados do traço padrão.

Média dos resultados Ensaio Marshall - Traço padrão					
Teor de CAP (%)	3,5	4,0	4,5	5,0	5,50
Densidade aparente (g/cm ³)	2,30	2,33	2,35	2,36	2,37
Volume de vazios (%)	7,03	5,03	3,47	2,24	1,43
RBV (%)	52,84	61,39	74,97	82,31	89,94
Estabilidade (kg)	983,58	773,44	937,99	897,60	913,55
Fluência (mm)	3,70	4,10	3,70	4,10	3,70

A Tabela 28 mostra a média dos resultados das misturas do traço com RFA, conforme o método Marshall.

Tabela 28- Média dos resultados do traço com RFA

Média dos resultados Ensaio Marshall - RFA com 3,5 % de CAP					
Teor de CAP (3,5% +)	0,5	1,5	2,0	2,5	3,0
Densidade aparente (g/cm ³)	2,29	2,31	2,36	2,37	2,38
Volume de vazios (%)	6,73	5,095	2,20	1,39	0,30
R.B.V (%)	57,15	64,05	84,03	88,85	97,93
Estabilidade (Kg)	1228,87	1430,23	1757,84	1358,35	1272,88
Fluência (mm)	3,20	2,50	2,50	2,50	2,70

Os valores do teor de projeto do ligante asfáltico (CAP) são:

- Traço padrão = 4,70%
- Traço com RFA = 5,0%

A Tabela 29 apresenta os resultados dos teores ótimos das misturas padrão e com RFA.

Tabela 29- Média dos resultados encontrados com o Teor Ótimo de CAP para os traços Padrão e com RFA.

Média dos resultados - Ensaio Marshall			DNIT ES - 031/06
Mistura asfáltica - Teor de CAP	Padrão 4,70%	RFA 5,0 %	-----
Densidade aparente (g/cm ³)	2,33	2,33	-----
Volume de vazios (%)	3,92	3,30	3 - 5
R.B.V (%)	73,30	77,65	75 - 82
Estabilidade (kg)	833,21	1525,97	500 - mín.
Fluência (mm)	2,90	3,50	2,0 - 4,5 mm

Tendo como parâmetro de controle as normas DNIT - 031/2006 – ES Pavimento Flexíveis - Concreto Asfáltico e a norma DNER- ME 043/95 Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall, verifica-se que a mistura com RFA está dentro dos limites dos máximos e mínimos exigidos.

5.5.4 Módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT) por compressão diametral

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados conforme descrito no item 4.3.1, à temperatura de 25 °C. Os resultados apresentados referem-se ao teor de projeto de cada mistura. Cada um dos três corpos de prova de cada mistura foi submetido a três níveis de cargas, e os valores de MR admitidos de cada corpo de prova é sempre a média dos MRs obtidos nesses três ciclos. O valor de MR adotado para a mistura é a média dos valores de MR admitidos de cada corpo de prova, após análise de dispersão. Este procedimento estatístico é o adotado pelo laboratório de pavimentação da COPPE para determinação do MR, para um nível de confiança de 95%.

Os resultados referentes aos corpos de prova das misturas no teor de projeto da mistura padrão e reciclada, no caso, 4,70% e 5% de CAP 50/70, respectivamente. Os resultados

podem parecer muito elevados à primeira vista, para a mistura reciclada, mas tem sido relativamente comum encontrar esta ordem de grandeza para concretos asfálticos reciclado com ligantes envelhecido que se mostra bastante viscoso, tornando o módulo de resiliência bastante elevado.

Os ensaios de resistência à tração foram realizados conforme item 4.3.2. As Tabelas 30 e 31 apresentam as médias e os desvios padrão dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, em MPa, realizados em três misturas estudadas. A média leva em conta os valores encontrados para os corpos-de-prova que, antes destes ensaios, tinham sido submetidos ao ensaio de MR e em amostras virgens. Como o ensaio de MR não é destrutivo e o nível de tensões ao corpo de prova aplicado é muito baixo, não se tem perda ou ganho de resistência devido a esta condicionante.

Tabela 30 - Resultado do ensaio de módulo de resiliência e resistência à tração para o traço padrão.

CPs Moldados (Traço Padrão)				
Nº do CP	Espessura média (cm)	Diâmetro médio (cm)	MR (MPa)	RT (MPa)
18078	5,89	10,15	2606	0,73
18079	5,91	10,15	2638	0,72
18080	5,91	10,15	3566	0,81
MÉDIA			2937	0,75
DESVIO-PADRÃO			545	0,05

Tabela 31- Resultado do ensaio de módulo de resiliência e resistência à tração para o traço com RFA.

CPs Moldados (Traço RFA)				
Nº do CP	Espessura média (cm)	Diâmetro médio (cm)	MR (MPa)	RT (MPa)
18090	5,86	10,17	7123	1,35
18091	5,85	10,15	8882	1,41
18092	5,83	10,13	8320	1,39
MÉDIA			8108	1,38
DESVIO-PADRÃO			898	0,03

A título de comparação, citam-se na Tabela 32 os valores de módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT) de vários autores obtidos por alguns dos trabalhos consultados nesta pesquisa. Pode-se notar que a ordem de grandeza dos MRs e RTs para misturas com agregados convencionais ou com escória não estão na mesma ordem de grandeza dos obtidos nesse trabalho com o asfalto reciclado.

Tabela 32- Resultado dos ensaios de módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT) de vários autores.

Referência	Tipo Agregado	Tipo de Ligante	Teor de Ligante (%)	MR (25 °C) MPa	RT (25 °C) MPa
Yi (2008)	50% Escória 50% Brita (SMA)	80/100	5,5	3579 3993	0,90 0,80
Mourão (2003)	Brita + filer pó de Pedra (SMA)	50/70	6,5	2220 2034	0,79 0,90
Vasconcelos (2004)	Brita (SMA)	50/60	6,7 6,9	4747 3367	0,98 0,82

O alto valor do MR e da RT da mistura reciclada está ligado ao CAP envelhecido, contido no resíduo fresado do pavimento asfáltico (RFA), que é, em geral, bem viscoso, uma vez que perdeu os elementos responsáveis pelas suas propriedades resilientes, tornando a matriz pétreia bastante dura, elevando assim, o módulo de elasticidade.

As análises dos ensaios mostraram através dos resultados obtidos, que o efeito do CAP novo empregado na preparação da dosagem da mistura, não agiu como um corretor de viscosidade sobre o asfalto oxidado, e ao fato das misturas não terem sofrido envelhecimento por duas horas na estufa, conforme procedimento de simulação da usinagem e transporte previsto pela norma ABNT NBR 15897/2010, não influenciou na preparação das amostras para ensaios mecânicos, com isso, não obtendo a melhor homogeneidade do processo de termo regeneração;

É importante comentar que o módulo de resiliência está relacionado à rigidez da mistura asfáltica. A análise do módulo de resiliência não pode ser feita de forma direta, valores maiores ou menores podem ser aceitos, dependendo da estrutura do pavimento. O que deve ser considerado é a compatibilidade de rigidez entre as camadas do pavimento. Também deve haver compatibilidade entre os valores de rigidez e resistência dos materiais constituintes.

Salienta-se que os valores de módulo de resiliência e de resistência à tração da mistura são essenciais para o dimensionamento da estrutura do pavimento, quando se adotam métodos mecanísticos que têm como base o cálculo de tensões, deformações e deslocamento das camadas constituintes do pavimento.

5.5.5 Ensaio de fadiga por compressão diametral

Os ensaios de fadiga foram realizados conforme descrito no item 4.3.3. As duas misturas foram ensaiadas (RFA e Padrão) a tensão controlada, a 25°C. Nas Figuras 108 e 109

são apresentadas as curvas de fadiga dessas misturas, respectivamente, em função da diferença de tensões e da deformação inicial. As fichas dos ensaios estão apresentadas no Anexo.

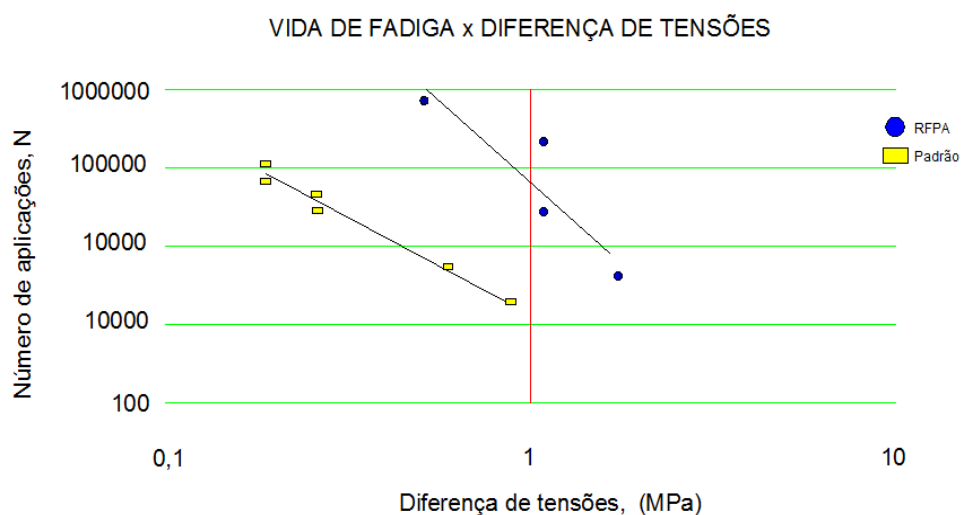


Figura 108 - Vida de fadiga *versus* diferença de tensões das misturas RFA e Padrão.

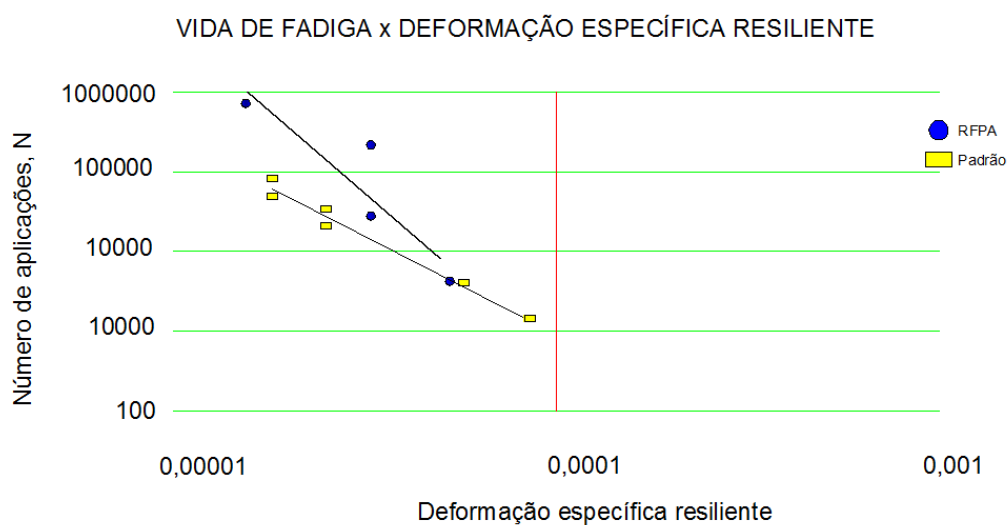


Figura 109 - Vida de fadiga *versus* deformação específica resiliente das misturas Padrão e RFA.

Na Tabela 33 mostram-se os valores dos parâmetros da equação da vida de fadiga em função da diferença de tensões e em função da deformação específica resiliente das misturas ensaiadas nesse estudo. Não é possível uma comparação direta entre essas duas curvas tendo em vista que os módulos de resiliência das misturas são muito diferentes. Portanto, para testar a influência dessas misturas na vida de fadiga é preciso usar um estudo paramétrico, testando em uma ou mais estruturas de pavimento. Assim, realizou-se uma simulação de tempo de vida de cada uma das misturas num pavimento arbitrário.

Para comparação também estão apresentados na Tabela 33 alguns resultados de vida de fadiga obtida para mistura asfáltica do tipo SMA com agregado siderúrgico, obtidos por Tavares (2012).

Tabela 33 - Resultados de vida de fadiga.

Misturas	Ligante	$N = k1 * \Delta\sigma^{n1}$ ou $N = K2 * \epsilon_r^{n2}$			R ²
		K1	K2	n1, n2	
RFA	CAP 50/70	65598	2^{-16}	-4,563	0,816
Padrão	CAP 50/70	1335	8^{-08}	-2,539	0,961
Tavares (2012)	CAP 30/45	11527	2^{-09}	-2,811	0,963
	CAPFLEX-B	3342	2^{-09}	-3017	0,97

De posse dos dados do ensaio, foram realizadas simulações com o programa SisPav, elaborado por FRANCO (2007). O modelo de comportamento de fadiga existente no programa é em função da deformação específica e do MR, como mostrado na equação 5.0 como um modelo genérico. Para a simulação desse estudo, adotou-se o fator de regressão K3 igual a zero e assim foi possível a análise com as equações obtidas pelos ensaios de fadiga das misturas dessa pesquisa.

$$N = fcl * K1 * \varepsilon_t^{K2} * MR^{K3} \quad \text{eq. (5.0)}$$

Onde:

N = Vida de fadiga;

fcl = Fator campo laboratório;

$K1$ = Coeficiente de regressão;

$K2$ = Coeficiente de regressão;

$K3$ = Coeficiente de regressão;

MR = Módulo de resiliência da mistura asfáltica (MPa);

ε_t = Deformação específica de tração.

5.6 SIMULAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO PELA TEORIA MECANISTICA, EMPREGANDO O PROGRAMA COMPUTACIONAL SISPAV

5.6.1 Generalidades

A fim de se conhecer a aplicação prática desta pesquisa aos perímetros da cidade de Manaus, empregaram-se alguns resultados dos ensaios laboratoriais no programa SisPav.

Para o dimensionamento da estrutura do pavimento foi empregado o solo de referência com adição do RFA estudados nessa pesquisa, a mistura M5 por apresentar melhores resultados técnico-econômicos, em conjunto com a mistura asfáltica reciclada oriunda do RFA. A seguir, serão detalhadas as informações utilizadas referentes a cada grupo de entrada de dados no programa computacional SisPav. desenvolvido por Franco (2007).

5.6.2 Estudo de Tráfego

Admitiu-se o período de projeto de 10 anos (vida útil do pavimento), considerando-se o ano de abertura ao tráfego em 2014 (ano 01) e final da vida útil em 2023.

Na intenção de verificar a viabilidade de aplicação das análises desta pesquisa, foram escolhidas duas situações distintas, no que se refere à intensidade do tráfego, em cada simulação com o número de N diferentes.

O dimensionamento do tráfego utilizado pelo programa SisPav considera o efeito de cada configuração de eixo sob a estrutura do pavimento, portanto, é necessário selecionar a configuração de cada eixo dentro de uma coleção pré-estabelecida pelo programa, conforme a Figura 110. A partir desta configuração, o programa calcula as tensões e deformações nos pontos críticos da estrutura.

Além disso, o programa ainda considera a variação lateral do tráfego no acúmulo de danos no pavimento, à porcentagem de veículos na faixa de projeto, dimensões entre eixos, dimensões entre rodas, vida de projeto em anos, o alinhamento crítico do projeto e a variação anual do tráfego.

	Configuração do semi-eixo	Descrição do eixo	Limite do Peso Bruto (kg)	Limite com Tolerância (kg)
1		<i>eixo simples isolado</i>	6.000	6.450
2		<i>dois eixos simples (direcional)</i>	12.000	12.900
3		<i>dois eixos simples (pneus extralargos)</i>	17.000	18.275
4		<i>três eixos simples (pneus extralargos)</i>	25.500	27.413
5		<i>eixo simples de quatro rodas</i>	10.000	10.750
6		<i>dois eixos de quatro rodas (em tandem)</i>	17.000	18.275
7		<i>dois eixos de quatro rodas</i>	15.000	16.125
8		<i>três eixos em tandem de quatro rodas</i>	25.500	27.413
9		<i>conjunto de dois eixos (especial)</i>	13.500	14.513

Figura 110 - Configura de eixos utilizada pelo programa SisPav (FRANCO, 2007)

O detalhamento do tráfego utilizado pelo SisPav considera o eixo e volume de tráfego para o cálculo do número N, o que é diferente dos métodos que detalham o tráfego por classes de caminhões, números de eixos por caminhão, volume de tráfego horário por caminhão e outros. Este cálculo é feito internamente ao programa somente para dar alternativa para o projeto, se não se tem os dados detalhados do estudo de tráfego.

A pressão de inflação dos pneus é um dos fatores que influencia no cálculo do número N realizado pelo SisPav, sendo que nesta pesquisa foi utilizada de 0,800 MPa, por ser o valor próximo aos sugeridos por alguns fabricantes de pneus, conforme Franco (2007). Pesquisas realizadas na COPPE verificaram que muitos veículos utilizam pressão de inflação superiores a 0,800 MPa. Outro fator que é importante para o cálculo do número N pelo SisPav é o peso dos veículos, sendo que nesta pesquisa foi utilizada a referência da carga legal por eixo, o que nem sempre condiz com a realidade dos veículos que trafegam atualmente em Manaus.

Nessa primeira simulação, foi escolhida uma rua coletora principal denominada Araújo Filho, situada no bairro de Petrópolis na cidade de Manaus, com característica de um tráfego meio pesado. Foram colhidas as informações da demanda de veículos nos horários de pico, ou seja, pela manhã, das 06:30h às 08:30h, e tarde/noite, das 17:00h às 19:00h. A figura 111 apresenta a localização da rua pesquisada.

Dados do Tráfego

- Variação lateral do tráfego: 0.30m
- % de veículos na faixa de tráfego: 90%
- Distância média entre rodas (SX): 0.324m
- Distância média entre eixos (SY): 1.200m

A figura 112 mostra a inserção de dados do tráfego dessa rua, sendo essas informações coletadas junto ao Instituto Municipal de Engenharia e Fiscalização do Trânsito – MANAUSTRANS, que constam em anexo nesta pesquisa.



Figura 111 - Mapa localização da Rua Araújo Filho.

Tráfego previsto

	Tipo	Rodas	Volume	Taxa	Peso (kgf)	Pressão (MPa)
1	1 - Eixo Simples	1	25000	0,000	6000,00	0,800
2	1 - Eixo Simples	1	25000	0,000	6000,00	0,800
3	2 - Dois eixos simples (direcional)	2	25000	0,000	12000,00	0,800
4	3 - Dois eixos simples (super single)	2	25000	0,000	17000,00	0,800
5	4 - Três eixos simples (super single)	3	25000	0,000	25500,00	0,800
6	5 - Eixo simples de roda dupla	2	25000	0,000	10000,00	0,800
7	6 - Dois eixos duplos	4	25000	0,000	15000,00	0,800

Eixo	Tipo	Configuração	Rodas	Volume (1º Ano)	Taxa (%aa)	Carga (kg)	Pressão (MPa)
2	1	Eixo Simples	2	25000.00	0000	6000.00	0.8000
3	2	Dois eixos simples (direcional)	4	25000.00	0000	12000.00	0.8000
4	3	Dois eixos simples (super single)	4	25000.00	0000	17000.00	0.8000
5	4	Três eixos simples (super single)	6	25000.00	0000	25500.00	0.8000
6	5	Eixo simples de roda dupla	4	25000.00	0000	10000.00	0.8000
7	6	Dois eixos duplos	8	25000.00	0000	15000.00	0.8000
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							

	Total
Total	100.00
Jan	8.333
Fev	8.333
Mar	8.333
Abr	8.333
Mai	8.333

Figura 112 - Tela do SisPav utilizada para o cálculo de um tráfego meio pesado.

Fonte: Manaustrans.

5.6.3 Dados sobre o ambiente proposto nesta dissertação

A seguir, destacam-se as informações referentes ao clima, para a cidade de Manaus utilizada nesta pesquisa, inseridas no programa SisPav, conforme Figura 113.

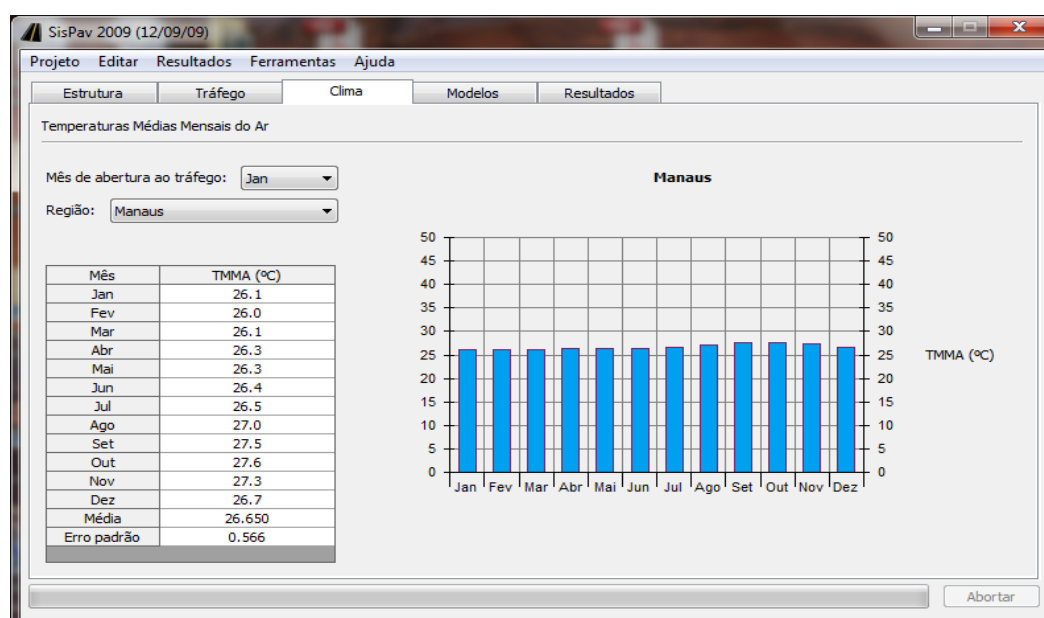


Figura 113 - Informações referentes ao clima inseridos no programa SisPav

5.6.4 Fatores Climáticos Regionais

Local:	Manaus
Mês de Abertura do Tráfego:	Janeiro
Temperatura Média Anual do Ar:	26.65°C

O SisPav considera as informações de clima na avaliação do envelhecimento do ligante asfáltico da camada de revestimento. Os valores de módulo de resiliência e do coeficiente de Poisson, da referida camada, são influenciadas pelo clima. O algoritmo do programa consegue conjugar os efeitos do envelhecimento da mistura com o impacto da variação mensal dos carregamentos sobre a vida de projeto e o acúmulo de danos na estrutura, utilizando informações do clima (FRANCO. 2007).

5.6.5 Materiais propostos nesta pesquisa

Esta pesquisa propõe, como alternativa, avaliar a utilização do RFA na estabilização granulométrica de um solo de baixa capacidade de suporte M1, com a mistura que apresentou os melhores resultados M5, simulando a aplicação desse material na camada de base e reaplicando o RFA como material de revestimento asfáltico utilizando os valores determinados pelos ensaios de módulo de resiliência, conforme resultados apresentados nessa pesquisa.

A estrutura do pavimento será dimensionada seguindo a alternativa do estudo dos materiais:

- Revestimento reciclado em Concreto Asfáltico Usinado a Quente – CAUQ. Utilizando o RFA na faixa C do DNIT;
- Base: terá a seguinte alternativa de materiais para o dimensionamento do pavimento:

- Misturas M5.

- Sub-base terá a seguinte alternativa de material para o dimensionamento do pavimento:

- Sub-base composto de um solo laterítico, proposto pelo SisPav.

Para o subleito será utilizado o valor cadastrado no SisPav para subleito do tipo II. Os valores de módulo para os três tipos de subleito, I, II e III estão no Manual do DNIT (2006), tendo inicialmente sido estabelecidos em Preussler (1983), em unidades kgf/cm^2 . Para o uso no SisPav, foram convertidos para MPa, por FRANCO (2007).

No SisPav, o comportamento mecânico das misturas asfálticas é representado pelo módulo de resiliência, sendo necessário também caracterizar a mistura asfáltica com base nas seguintes informações (FRANCO, 2007):

- Módulo de resiliência e coeficiente de Poisson;
- Granulometria da mistura;
- Parâmetros de viscosidade do ligante; e
- Índices volumétricos.

Para os solos e britas estabilizados com cimento, além dos parâmetros de MR e coeficiente de Poisson, o SisPav leva em consideração a resistência à tração. Mas, para o tipo de material considerado, solo melhorado com cimento, a resistência à tração não é considerada.

O principal critério de ruptura do pavimento, no dimensionamento com camada tratada quimicamente, é a fadiga do revestimento asfáltico ou da camada cimentada, quando esta apresentar módulo maior que do concreto asfáltico. Para expressar este critério, no sistema SisPav, há internamente, equações genéricas de fadiga, que são comparadas com o

número de repetições de carga do tráfego para definir a vida útil, como porcentagem de área trincada admissível.

Para os materiais granulares e solos lateríticos, o SisPav utiliza os parâmetros de módulo de resiliência, expresso por vários modelos de comportamento elástico não linear, associados a códigos, como mostra a figura 114.

Classe	Material	Modelo
0	Asfáltico	$M_r = f(t^0 C)$
1	Granular	$M_r = K_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$
2	Argiloso	$M_r = \begin{cases} k_2 + k_3 \cdot (k_1 - \sigma_d), & \forall k_1 > \sigma_d \\ k_2 + k_4 \cdot (\sigma_d - k_1), & \forall k_1 \leq \sigma_d \end{cases}$
3	Misturas asfálticas, solo cimentado de módulo elevado ou solo siltooso de módulo baixo	$M_r = \text{constante}$
4	Solos arenosos com bastante argila e solos lateríticos finos	$M_r = \begin{cases} [k_2 + k_3 \cdot (k_1 - \sigma_d)] \cdot \sigma_3^{k_2}, & \forall k_1 > \sigma_d \\ [k_2 + k_4 \cdot (\sigma_d - k_1)] \cdot \sigma_3^{k_2}, & \forall k_1 \leq \sigma_d \end{cases}$
5	Granular (dependente da soma das tensões principais)	$M_r = K_1 \cdot \theta^{k_2}$
6	Argiloso (dependente da tensão desvio)	$M_r = K_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$
7	Todos os solos e britas em geral	$M_r = K_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$

Figura 114 - Modelos de comportamento resiliente de materiais de pavimentação utilizado pelo SisPav (Franco, 2007).

O programa SisPav permite o uso de outros três critérios adicionais: a tensão limite no topo do subleito (critério de ruptura por cisalhamento), a deflexão máxima na superfície do pavimento (alternativa do critério de fadiga) e a deformação permanente, ou afundamento de trilha de roda (ATR), que poderá ser calculado como somatório de contribuição de todas as camadas, através de modelos de estimativa de deformação permanente, também estabelecidos a partir de ensaios próprios de carga repetida. Porém, como nesta pesquisa não foram feitos

ensaios para estabelecer esses modelos de deformação permanente dos materiais, nestas simulações não serão os principais critérios de ruptura estrutural do pavimento.

Estudos e discussões detalhadas sobre a deformação permanente de solos, britas e lateritas podem ser vistos, por exemplo, em Guimarães (2009), que também discute a questão do acomodamento destas deformações com os ciclos de carga, fenômeno que acontece com muitos solos tropicais, mesmo os finos, quando laterizados.

As simulações do dimensionamento do pavimento visarão à menor espessura das camadas, que atendam especialmente o critério de fadiga. Sempre que possível, será testada a menor espessura da camada de revestimento, independentemente do padrão estabelecido no método DNIT, que associa esta espessura ao número N do tráfego, sem levar em conta as características do concreto asfáltico. O SisPav admite, internamente, para ajuste automático de espessura, o limite de 60 cm para as camadas de base e sub-base e de 20 cm para o revestimento.

Para o dimensionamento no SisPav, como qualquer outro sistema de dimensionamento mecanístico-empírico, é necessário que sejam informadas as espessuras iniciais de todas as camadas. O programa fará um ajuste automático da espessura de uma das camadas que for escolhida (por marcação de um “x”) até atender ao critério de dimensionamento.

Para os dimensionamentos das espessuras das camadas do pavimento, iniciou-se definindo as espessuras das camadas de base e sub-base em 60 cm e ajustando a espessura do revestimento para a menor espessura que atenda à vida de projeto. Realizando este procedimento como avaliação inicial, prosseguiu-se ajustando por tentativa as espessuras das demais camadas para se obter a menor estrutura do pavimento que atenda a vida de projeto.

Todas as simulações foram realizadas utilizando os valores dos ensaios de MR das misturas com RFA, em conjunto com as modificadas por cimento aos 24 dias de cura. Para as

amostras M5 e M6, com teor de cimento de 2% e 4%. A figura 115 apresenta a inserção de dados referentes à mistura asfáltica reciclada.

Propriedades da camada

Camada selecionada -> 1

Material: **Mistura asfáltica**

Espessura (m): 0.0800
 Coeficiente de Poisson: 0.3370
 Aderência na interface: 0.0000

Modelo constituinte (MPa)

3 - Elástico linear

Mr (MPa)	8320.0000
----------	-----------

Parâmetros

Tipo de CAP	CAP 50/70
Penetração 100g 5s 25°C 0,1mm	63.0
Ao (visc x T)	11.123
VTSO (visc x T)	-3.713
Volume de vazios (%)	3.30
Teor de asfalto (%)	5.0
RBV (%)	77.65
Faixa Granulométrica (DNIT)	Faixa C
% passando #3/4	100.0
% passando #3/8	80.0
% passando #4	58.0
% passando #200	6.0
Identificação	
Massa específica (kg/m³)	

Valores sugeridos >> OK Cancel

Figura 115 - Parâmetros da mistura reciclada do RFA inseridos no SisPav.

A figura 116 mostra o modelo de comportamento da fadiga de misturas asfálticas (Franco 2007).

SisPav 2009 (12/09/09) - DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO. dissertação.pvt

Projeto Editar Resultados Ferramentas Ajuda

Estrutura Tráfego Clima Modelos Resultados

Fadiga

- Mistura asfáltica
- Solo-cimento
- Material tratado com cimento
- Deflexões admissíveis

Deformação permanente

- Mistura asfáltica
- Material granular
- Solos lateríticos
- Solos finos, siltosos ou argilosos

Tensão limite no Subleito

Modelo de comportamento: **Fadiga de Misturas Asfálticas**

$$N_f = fcl \cdot k_1 \cdot \epsilon_i^{k_2} \cdot Mr^{k_3}$$

☒ Bloqueado

Parâmetros:

Parâmetro	Valor
Fator Campo-Laboratório (fcl):	10000.00
Coefficiente de Regressão (k1):	1.904e-6
Coefficiente de Regressão (k2):	-2.821
Coefficiente de Regressão (k3):	-0.740
Erro padrão (%):	40

Observações:

Fonte: Franco (2007)
 Modelo obtido com base em resultados de 54 ensaios de laboratório da COPPE
 N = 536 pontos e R² = 0,805
 Mr = Módulo de resiliência em MPa
 et = Deformação específica de tração
 Nf = Vida de fadiga

Calcula o dano relativo à fadiga na base da camada de revestimento.

Abortar

Figura 116 - Tela do programa SISPAV - Critério de fadiga para dimensionamento de pavimento para o RFA reciclado.

A figura 117 apresenta a inserção de dados da mistura M5 na simulação do dimensionamento da camada de base do pavimento do programa SisPav.

The screenshot shows the 'Propriedades da camada' dialog box for layer 2. The 'Material' is set to 'Solo melhorado com cimento'. The 'Espessura (m)' is 0.2500, 'Coeficiente de Poisson' is 0.3500, and 'Aderência na interface' is 0.0000. The 'Modelo constituinte (MPa)' is '1 - Granular f(sigma3)'. The 'Parâmetros' table lists: Identificação (M5), Teor de cimento (%) (2.0), Umidade ótima (%) (12.70), Massa específica (kg/m³) (1.82), and Energia de compactação (Modificada). Buttons at the bottom include 'Valores sugeridos >>', 'OK', and 'Cancel'.

Camada selecionada -> 2	
Material:	Solo melhorado com cimento
Espessura (m):	0.2500
Coeficiente de Poisson:	0.3500
Aderência na interface:	0.0000
Modelo constituinte (MPa)	
1 - Granular f(sigma3)	
k1	4973.2000
k2	0.6515

Parâmetros	
Identificação	M5
Teor de cimento (%)	2.0
Umidade ótima (%)	12.70
Massa específica (kg/m³)	1.82
Energia de compactação	Modificada

Figura 117 - Parâmetros da mistura M5 para o dimensionamento da base do pavimento.

A figura 118 apresenta a inserção de dados para a simulação do dimensionamento da camada de sub-base do pavimento, sugerido pelo SisPav.

The screenshot shows the 'Propriedades da camada' dialog box for layer 3. The 'Material' is set to 'Solo laterítico'. The 'Espessura (m)' is 0.2000, 'Coeficiente de Poisson' is 0.3500, and 'Aderência na interface' is 0.0000. The 'Modelo constituinte (MPa)' is '3 - Elástico linear'. The 'Parâmetros' table lists: Identificação, Classificação, Umidade ótima (%), Massa específica (kg/m³), Energia de compactação, and Grau de compactação (%). Buttons at the bottom include 'Valores sugeridos >>', 'OK', and 'Cancel'.

Camada selecionada -> 3	
Material:	Solo laterítico
Espessura (m):	0.2000
Coeficiente de Poisson:	0.3500
Aderência na interface:	0.0000
Modelo constituinte (MPa)	
3 - Elástico linear	
Mr (MPa)	130.0000

Parâmetros	
Identificação	
Classificação	
Umidade ótima (%)	
Massa específica (kg/m³)	
Energia de compactação	
Grau de compactação (%)	

Figura 118 - Parâmetros do dimensionamento da sub-base do pavimento sugerido pelo SisPav.

Foram feitas algumas simulações realizadas considerando-se os resultados de MR para as misturas ensaiadas, sempre mantendo o subleito como tipo II, a sub-base com material laterítico proposto pelo SisPav, e a base com a mistura melhorada com adição de 2% de cimento M5, tendo em vista que nos ensaios realizados com os teores de cimento alcançaram resultados maiores aos que resultam em RCS de 2,1 MPa, critério atual de definição de solo-cimento.

A figura 119 apresenta o modelo para subleito do tipo II. Os valores de módulo para os três tipos de subleito, I, II e III estão no Manual do DNIT (2006).

Propriedades da camada

Camada selecionada -> SL

Material: Solos finos, siltosos ou argilosos

Espessura (m): 0.2000

Coefficiente de Poisson: 0.2500

Aderência na interface: 0.0000

Modelo constituinte (MPa): 3 - Elástico linear

Mr (MPa)	3000.0000
----------	-----------

Parâmetros

Classificação (DNIT)	Tipo II
CBR (%)	7
% Silte na fração fina #200	50.0
Identificação	
Umidade ótima (%)	
Massa específica (kg/m³)	
Energia de compactação	
Grau de compactação (%)	

Valores sugeridos >> OK Cancel

Figura 119 - Parâmetros sugeridos por Franco (2007) para o subleito.

A figura 120 apresenta a tela do programa SISPAV analisando o dimensionamento de pavimento para o RFA reciclado para um volume de tráfego meio pesado.

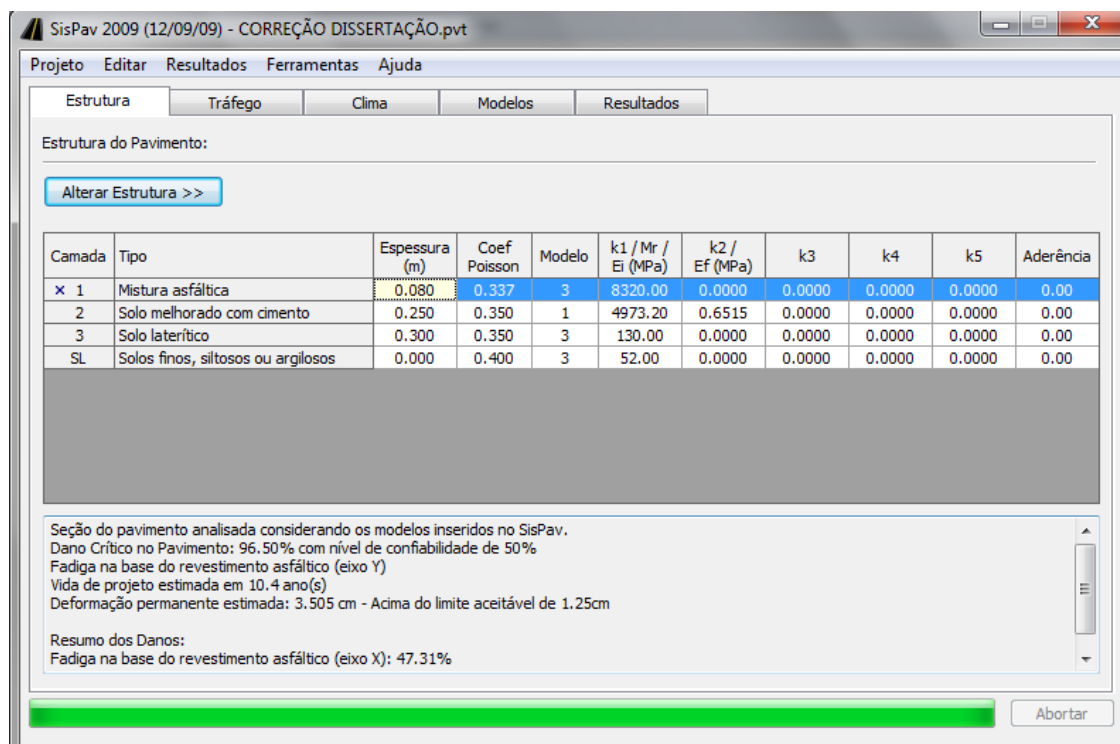


Figura 120 - Tela do programa SISPAV - Estrutura analisada no dimensionamento de pavimento para um volume de tráfego meio pesado.

A tabela 35 apresenta o resumo dos resultados do programa Sispav após a análise do dimensionamento das camadas do pavimento para um tráfego meio pesado, utilizando a mistura asfáltica reciclada como revestimento e a mistura M5 como base.

Tabelas 35 - Resumo dos resultados do programa Sispav após a análise do dimensionamento das camadas do pavimento para tráfego meio pesado.

Camada	Espessuras cm)	MR (MPa)	Vida de projeto estimada ano (s)
Revestimento K1 /MR 8320	8,0	-----	10,4
Base (M5)	25	$4973,2 \times 0,6515$	
Sub-base	30	130,00	
Subleito	0,0	52	

Nessa segunda simulação, as avenidas Efigênio Sales e Humberto Calderaro Filho, foram tomadas como exemplo e colhidas as informações da demanda de veículos nos horários de pico, ou seja, pela manhã, das 06:30h às 08:30h, e pela tarde/noite, das 17:00h às 19:00h. A figura 121 apresenta o mapa de localização das duas ruas estudadas nessa pesquisa.



Figura 121- Mapa de localização das Avenidas Efigênio Sales e Humberto Calderaro Filho.

A figura 122 apresenta a inserção de dados de tráfego dessas ruas, sendo essas informações coletadas junto ao Instituto Municipal de Engenharia e Fiscalização do Trânsito – MANAUSTRANS que constam em anexo nesta pesquisa.

Eixo	Tipo	Configuração	Rodas	Volume (1º Ano)	Taxa (%aa)	Carga (kg)	Pressão (MPa)
1	1	Eixo Simples	2	139722.00	6.5	6000.00	0.8000
2	5	Eixo simples de roda dupla	4	236500.00	6.5	10000.00	0.8000
3	7	Dois eixos duplos em tandem	8	372830.00	6.5	17000.00	0.8000
4	6	Dois eixos duplos	8	114230.00	6.5	15000.00	0.8000
5	8	Três eixos duplos em tandem	12	48183.00	6.5	25500.00	0.8000
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							

Figura 122 - Tela do SisPav utilizada para o cálculo de um volume de tráfego muito pesado.
Fonte: Manaustrans.

A figura 123 apresenta a tela do programa Sispav após a análise do dimensionamento das camadas do pavimento para um tráfego pesado utilizando a mistura M5 como base.

Camada	Tipo	Espessura (m)	Coef Poisson	Modelo	k1 / Mr / Ei (MPa)	k2 / Ef (MPa)	k3	k4	k5	Aderência
1	Mistura asfáltica	0.080	0.337	3	8320.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
2	Solo melhorado com cimento	0.250	0.350	1	4973.20	0.6515	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
3	Solo laterítico	0.300	0.350	3	130.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
SL	Solos finos, siltosos ou argilosos	0.000	0.400	3	52.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00

Figura 123 - Tela do programa SISPAV - Estrutura analisada no dimensionamento de pavimento para volume do tráfego muito pesado.

As tabelas 36 apresenta o resumo dos resultados do programa Sispav após a análise do dimensionamento das camadas do pavimento para um tráfego muito pesado utilizando a mistura asfáltica reciclada como revestimento e a misturas M5 como base.

Tablas 36 - Resumo dos resultados do programa Sispav após a análise do dimensionamento das camadas do pavimento para tráfego muito pesado.

Camada	Espessuras cm)	MR (MPa)	Vida de projeto estimada ano (s)
Revestimento K1 /MR 8320	8,0	-----	5,5
Base (M5)	25	$4973,2 \times 0,65^{15}$	
Sub-base	30	130,00	
Subleito	0,0	52	

As simulações tendem a mostrar que, nesse segundo caso as espessuras de revestimento e as camadas subjacentes, estabelecidas no projeto da estrutura do pavimento, não foram suficientes para suportar um volume de tráfego muito pesado.

Observa-se que as simulações não satisfaria o período de projeto de dez anos, para um volume de tráfego muito pesado, por exemplo, expresso pelo N da segunda simulação de projeto. A vida de fadiga ficou muito baixa e, eventualmente, a espessura poderia ser aumentada. No entanto, a primeira simulação para um tráfego relativamente meio pesado a vida de projeto foi atendida.

A titulo de comparação foram realizadas outras simulações, com N característicos de tráfego da cidade de São Paulo, dados fornecidos pelo grupo de trabalho instituído pela portaria 248/2002 da Secretaria de Infraestrutura Urbana - SIURB da prefeitura do município de São Paulo que teve como objetivo revisar e atualizar as normas de pavimentação.

Um apoio fundamental, que norteou o trabalho desenvolvido, foi dado pelo prof. Dr. José Tadeu Balbo, professor da Escola Politécnica da USP na área de transportes.

A tabela 37 apresenta o resumo dos resultados do programa Sispav após a análise do dimensionamento das camadas do pavimento para vários tipos de tráfego, parâmetros adotados para a classificação das vias da prefeitura municipal de São Paulo, utilizando a mistura asfáltica reciclada como revestimento e a misturas M5 como base.

Tabela 37 - Resumo dos resultados do programa Sispav após a análise do dimensionamento das camadas do pavimento, vida de projeto em anos.

Resumo dos principais parâmetros adotado para a classificação das vias da Prefeitura Municipal de São Paulo - PMSP						
FUNÇÃO PREDOMINANTE	TRÁFEGO PREVISTO	VOLUME INICIAL NA FAIXA MAIS CARREGADA		EQUIVALENTE POR VEÍCULO	N CARACTERÍSTICO	VIDA DE PROJETO SisPav anos
		VEÍCULO LEVE	CAMINHÃO E ÔNIBUS			
Via local residencial com passagem	Leve	100 a 400	4 a 20	1,50	10^5	18 *
Via coletora secundária	Médio	401 a 1500	21 a 100	1,50	5×10^5	15 *
Via coletora principal	Meio Pesado	1501 a 5000	101 a 300	2,30	2×10^6	10 *
Via arterial	Pesado	5001 a 10000	301 a 1000	5,90	2×10^7	8,4 +
Via arterial principal ou expressa	Muito Pesado	> 10000	1001 a 2000	5,90	5×10^7	5,1 +
Faixa Exclusiva de ônibus	Volume Médio	-----	< 500	-----	10^7	9,0 +
	Volume Elevado	-----	> 500	-----	5×10^7	5,1 +

* Revestimento 5 cm, base 10 cm e sub-base 15 cm.

+ Revestimento 8 cm, base 25 cm e sub-base 30 cm.

Com essa breve análise exploratória da aplicação do método mecanístico do programa computacional SisPav, mostrou-se a versatilidade do método e a diferenciação necessária do comportamento dos materiais de forma adequada para compor o “sistema” em camadas que é um pavimento, a compatibilização das rigidez dos materiais é fundamental.

Naturalmente muitas alternativas poderiam ser ainda tentadas e uma análise final de custos também deveria ser feita para embasar a escolha final da solução a ser empregada nessa pesquisa. Mas não foi objetivo “esgotar” o assunto: só ressaltar as possibilidades.

6 CONCLUSÕES

A pesquisa desenvolvida avaliou os resultados das misturas de solo de referência, que mostrou-se ter uma baixa capacidade de suporte, com o resíduo fresado do pavimento asfáltico (RFA), para aplicação em camadas de base e de pavimentos urbanos, de modo a disponibilizar uma alternativa técnica, econômica e ecologicamente viável à destinação final dos resíduos de fresagem de pavimentos asfálticos, oriundos da restauração e manutenção de vias urbanas.

A análise do material fresado mostrou que a fresagem produziu um material com boa distribuição granulométrica, mas com pequena quantidade de material fino, o que contribuiu para a mistura com o solo puro de referência, que já tem em sua granulometria um excesso de material fino, com 83% de argila. O material fino do resíduo fresado do pavimento asfáltico encontra-se misturado ao CAP que recobre o agregado da mistura. A composição granulométrica de um material fresado depende de fatores que não foram considerados nesta pesquisa (temperatura de fresagem, projeto da mistura asfáltica fresada, estado do dente de corte durante a operação, etc).

A determinação do teor de ligante presente na mistura fresada apontou valores como esperado para a mistura CAUQ convencionais de 3,5% de CAP.

Foi observado que a adição de material fresado proporcionou o aumento significativo de resistência em relação ao solo puro, atingindo um CBR de 145% na mistura M5 e CBR de 163% na mistura M6, compatível com as especificações para uso bases de pavimentos rodoviários (DNIT- ES 142/10), a resistência à compressão simples na mistura M5 atingiu um resultado satisfatório de 2297 kPa. Ao analisar o conjunto dos resultados obtidos para o solo puro M1e as misturas M2, M3, M4, M5e M6 pode-se concluir que os teores de cimento adotados nas misturas M5 e M6 que foram de 2% e 4% respectivamente possibilitaram o uso do material para execução de bases de pavimentos urbanos, com o menor valor de CBR de 145%, acima do mínimo estabelecido pelo DNIT ($\text{CBR} \geq 80\%$), para vias com tráfego pesado (DNIT- ES-142/10). Para todas as misturas, os valores de expansão foram compatíveis para uso em camadas de base de rodovias, conforme as especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT.

A pesquisa desenvolvida avaliou os resultados do emprego de concreto asfáltico reciclado a quente, fresado à taxa de reciclagem de 100%. Tais estudos mostraram a potencialidade do emprego de tal material a baixo custo, em situações onde bases asfálticas de elevado módulo de elasticidade fossem desejáveis, como se discorreu, em especial, para pavimentos asfálticos perpétuos e para bases rígidas.

As aplicações em escala real da mistura reciclada, em cada uma das simulações aplicando o programa computacional SisPav, mostraram a viabilidade da sua aplicação em um tráfego meio pesado a pesado. Dos casos de aplicação relatados, dependerá basicamente da produção permitida pela usina (móvel ou fixa) e também das habilidades de compactação oferecidas por tais materiais, em especial no caso de execução de grandes volumes de bases contínuas.

A mistura asfáltica reciclada estudada apresentou elevados valores para a estabilidade Marshall, para o módulo de resiliência e para a resistência à tração medida por compressão diametral, valores esses bastante acima dos corriqueiramente desejados para CAUQ. Os valores de fluência para a mistura estudada mostrou-se dentro de padrões aceitáveis convencionalmente. O estudo também mostrou que, para o material fresado reciclado, avaliado à taxa de 100% de reciclagem, seria bastante reduzida a porcentagem de novo ligante a ser possivelmente incorporada à mistura reciclada, quando se desejar uma mistura de elevada rigidez.

Os valores de módulo de resiliência mostraram-se compatíveis com materiais de elevada estabilidade e com a presença de ligante asfáltico endurecido na mistura. Acima dos 8000 MPa (medidas em laboratório) tem-se uma expectativa favorável, do ponto de vista de propriedades mecânicas, do emprego deste tipo de material como revestimento para pavimentos asfálticos, sejam do tipo perpétuo (novas construções, o que implica em grandes volumes e equipamentos de grande porte) ou como camada rígida de base para reparos em pavimentos, sejam valas, sejam remendos para pavimentos rodoviários ou urbanos (com equipamento de pequeno porte).

Uma vez que a ocorrência de dejetos, entulhos e rejeitos de construção civil e suas implicações ambientais cada dia se tornam um objeto de maior interesse da administração pública, considera-se indispensável o emprego apropriado de tais materiais, como é o caso de misturas asfálticas fresadas ou extraídas de qualquer outra maneira dos pavimentos existentes, mostrando que poderá representar uma economia de recursos financeiros em trabalhos de manutenção de pavimentos.

Constata-se a viabilidade econômica do Resíduo Fresado do Pavimento Asfáltico (RFA) nas misturas de solo e material fresado e solo material fresado com adição de 2% e 4% de cimento na estabilização granulométrica e química das misturas, e o emprego de concreto

asfáltico reciclado a quente, fresado a taxa de reciclagem de 100%, em relação às soluções usualmente empregadas, para a execução das camadas do pavimento, ou seja, de base e sub-base para solos de baixa capacidade de suporte e para o revestimento flexível, ocasionada principalmente pela redução de gastos com a aquisição de insumos, proporcionando, além de uma solução econômica, a preservação dos recursos naturais, com a diminuição da exploração de jazidas de novos materiais.

7 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A pesquisa realizada utilizando o material fresado gerado nas atividades de manutenção e restauração de vias de rolamento deve ser vista como um estudo inicial para outras pesquisas que envolvam o aperfeiçoamento das atividades propostas.

Com isso, sugere-se:

- Executar e acompanhar um trecho experimental utilizando a mistura de Solo/RFA com as proporções estudadas neste trabalho;
- Com a utilização do cimento nas misturas em camada de base, existe a possibilidade de surgir trincas de retração, o que pode causar a reflexão de trincas no revestimento: estudar a possibilidade de reflexão das trincas em pavimento com uso da mistura Solo/RFA com cimento.
- Executar ensaios de Cone de Penetração Dinâmica (DCP) e CBR *in situ* no trecho experimental, com a finalidade de obter correlações entre os ensaios realizados em laboratório e no campo;
- Avaliar a deflexões do trecho experimental através dos ensaios de viga Benkelman, através da técnica FWD (*Falling Weight Deflectometer*), realizando retroanálise dos dados obtidos;

- Realizar o estudo das propriedades mecânicas de misturas com solo argiloso, material fresado e cal;
- Executar e acompanhar a evolução dos conhecimentos sobre o comportamento do resíduo fresado do pavimento asfáltico reciclado a frio, com emulsão ou agente de reciclagem emulsionados.
- Trabalhos futuros poderiam avaliar o comportamento do módulo de resiliência do resíduo fresado do pavimento asfáltico, a partir da adição de agregados virgens ao material fresado e, até mesmo, a partir da adição de resíduos de outros processos industriais. Assim, poderia ser avaliada a adição de materiais não convencionais ao material fresado, já que o material fresado apresenta um grande potencial para a sua reutilização em camadas de pavimentos rodoviários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, EB-22. Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico. Rio de Janeiro, 1988.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR-12025. Solo cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1990.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR-6457. Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR-6508. Determinação da massa específica dos sólidos do solo. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR-7180. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

AEDO, J.L.C, 1997, **Programa para análise tridimensional de pavimentos asfálticos**. Dissertação de M.Sc., PUC-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ARAÚJO, L. M. D., de FARIAS, M. M. **Estabilização química na reciclagem de material asfáltico fresado e cascalho de base**. 8º ENACOR. Gramado, RS. 11 p. 2004.

ARAÚJO, L. M. D., de FARIAS, M. M., de CRAVALHO, J. C. **Estudo da influência das características mecânicas do fresado de revestimento asfáltico em misturas com cascalho de base rodoviária**. 34º Reunião Anual de Pavimentação. Campinas, SP. 14 p. 2003.

ASPHALT INSTITUTE. *The asphalt handbook. Manual Series*, n. 4 (MS-4), College Park, 1956. 46-8.

ASPHALT INSTITUTE. Disponível em <<http://asphaltinstitute.org>>. Acesso em 10 out 2010.

ASPHALT RECYCLING & RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. **Cold recycling**.

Asphalt Recycling & Reclaiming Association. Disponível em <http://www.arra.org/hot_in_place_recycling.html>. Acesso em 10 jul 2012.

ASPHALT RECYCLING & RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. **Hot in place recycling**. **Asphalt Recycling & Reclaiming Association**. Disponível em <http://www.arra.org/hot_in_place_recycling.html>. Acesso em 21 jul 2012.

ASPHALT RECYCLING & RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. **Hot recycling**. **Asphalt Recycling & Reclaiming Association**. Disponível em <http://www.arra.org/hot_in_place_recycling.html>. Acesso em 21 jul 2011.

Balbo, J. T. (1997) Deformações permanentes em mistura asfáltica reciclada. In: Ponencias del 9º. Congresso Ibero-Americano del Asfalto, Tomo 2, pp. 814-823, Asunción.

BATISTA, F. G. M. R. **Reabilitação de pavimentos flexíveis através de reciclagem com cimento.** Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração.** São Paulo, 2007.

BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G; CERATI, J. A. P; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica.** Rio de Janeiro, 2006.

BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G; CERATI, J. A. P; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica.** Rio de Janeiro, 2007.

BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G; CERATI, J. A. P; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica.** Rio de Janeiro, 2007.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos.** São Paulo, ed. Fazendo Arte, 2001.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos.** São Paulo: Fazendo Arte, 2007.

BRITO L.A.T. **Avaliação e análise paramétrica de compressão diametral sob carga repetidas em misturas asfálticas.** 2006. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BUDNY, J. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas.** Trabalho de conclusão de curso de mestrado em engenharia. Universidade do Rio de Janeiro – COPPE. Rio de Janeiro – RJ, 2012.

CARNEIRO, A. P; BURGOS, P. C; ALBERTE, E. P. V. **Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos,** 2008. Disponível em: <www.eccosystems.com.br/2008/artigos/reciclagem/6Projetoparareciclagemdeentulhodemateriaisdeconstrucao>. Acesso em: 05/10/2011.

CASTELLO BRANCO, J.E., **Estudo da eletrosmose em solos finos.** Dissertação de M.Sc., Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1978.

CRISTELO, N.M.C., **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2001.

CONCHA, Luis Marcial Collarte. **Estudo da fadiga de duas misturas de solo-cimento.** Tese de doutorado: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1986.

DAMA, M. A. et al. **Aplicação de reciclagem a frio com espuma de asfalto na restauração da BR-1-290 no trecho entre Eldorado do Sul e Porto Alegre.** 33ª Reunião Anual de Pavimentação. Florianópolis. 2001.

DAROUS, J. **Estudo comparativo entre sistemas de cálculo de tensões e deformações utilizados em dimensionamento de pavimentos asfálticos novos.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, (COPPE-UFRJ). Rio de Janeiro, 2003.

DAU, F. N. **Uma avaliação técnico/econômica da reciclagem de revestimentos asfálticos em usina em área urbana.** Trabalho de conclusão do curso de mestrado em engenharia. Universidade Federal do rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS. 2001.

DAVID, D. **Mistura asfáltica reciclada a frio:** estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado. 2006. 117 f. Dissertação (mestrado em Engenharia)-programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994, a) Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. DNER-ME 138/94, Rio de Janeiro.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ES 303/97: Especificação de serviço. Pavimentação – base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 049/94: Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 131/94: Solos – módulo de resiliência de amostras compactadas. Rio de Janeiro, 1994.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT – IPR 719. Manual de Pavimentação. 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2006.

Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte. DNIT: 033/2005 – Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico reciclado a quente na usina - Especificação de Serviço. Rio de Janeiro. 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – IPR 719.** Manual de Pavimentação. 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2006.

Dnit - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Es - 031. Pavimentos Flexíveis, Concreto Asfáltico, 2006.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, ES- 139. Solos – Pavimentação, Sub-base Estabilizada Granulometricamente, 2010.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, ES- 140. Solos – Pavimentação, Sub-base de Solo Melhorado com Cimento, 2010.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, ES- 141. Solos – Pavimentação, Base Estabilizada Granulometricamente, 2010.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, ES- 142. Solos – Pavimentação, Base de Solo Melhorado com Cimento, 2010.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, ME- 035, Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos, 1995.

DNIT - Departamento Nacional de infraestrutura de Transportes, ME- 053/94. Misturas Betuminosas – Porcentagem de Betume, 1994.

DNIT - Departamento Nacional de infraestrutura de Transportes, ME- 080, Solos – Análise granulométrica por peneiramento, 1994.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutrua de Transportes, ME- 083, Agregados – Análise granulométrica, 1998.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de restauração de pavimentos asfálticos. 2ª ed. Rio de Janeiro. 2006.

DNIT. **Manual de Estudos de Tráfego**. Publicação IPR-723. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006b.

DU, J. C., CROSS, S. A. **Evaluation of hot lime slurry in cold in-place recycling**. Flexible pavement rehabilitation and maintenance. Baltimore – USA. ASTM stock STP 1348. p. 68-80, 1998.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Cold in-place asphalt recycling** – aplication checklist. Publication No. FHWA-IF-06-012. 2005.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Cold in-place asphalt recycling** – aplication checklist. (1997).

FEDERATION OF CANADIAN MUNICIPALITIES (FCM). **Roads and sidewalks - reuse and recycling of road construction and maintenance materials - National Guide to Sustainable Municipal Infrastructure (InfraGuide)**. Canadá. 50 p. 2005.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **User Guidelines for byproduct and Secondary Use Materials in Pavement Construction. FHWARD-97-148**. 2008. Disponível em: <http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/index.htm> <<http://www.recycledmaterials.org/tools/uguidelines/index.asp>>. Acesso em: 22 fev. 2010.

FILHO, J.D.P. **Reconstruction of the airport of the city of Poso Alegre/MG, for recycling the cold in situ – A economic measure and ecologic**. International Symposium Pavement Recycling. São Paulo/SP, 2005. 155

FONSECA, P. **Engenharia e Pavimento, LTDA**. 2009. Disponível em: <<http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem>>. Acesso em: 24/05/2011.

FONSECA, P. **Reciclagem de pavimentos rodoviários**. Escola Superior de tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança. 2002. Disponível em <<http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf>>. Acesso em 10 jan 2013.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. **Método de dimensionamento mecanísticoempírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. Tese (Doutorado) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

GONÇALVES, F. J. P. **O desempenho dos pavimentos flexíveis – notas de aula**. 149p. 1999. Disponível em <<http://lci.upf.tche.br/~pugliero>>. Acesso em 7 set 2010.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. Tese (Doutorado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

HANSEN, T.C **Recycling of demolished concrete and masonry**. 2ªed. London: E&FN Spon, 1996. Part. 1, p.395

INGLES, O. G., METCALF, J. B., **Soil Stabilization : Principles and Practice**. Kandhal, P. S.; Mallick, R. B. (1997) Pavement recycling guidelines for state and local governments. Federal Highway. International, 2002.

LEITE, L. F. M., 1999, “Estudos de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímeros”. Tese de D. Sc., IMA/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Lopes, L. **Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos**. Trabalho de conclusão de curso de mestrado em engenharia em civil. Universidade Católica do Rio de Janeiro – RJ, 2011.

KANDHAL, P. S. ; MALLICK, R.B. **Agregate tests for hot mix asphalt: state of thepractice in North America**. Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association, Vol XLII, novembro, 1997.

KÉZDI, A., **Stabilized earth roads**. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam – Oxford – New York, 1979.

MACÊDO, M. M., **Solos modificados com cimento – Efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 2004.

MACÊDO, J.A.G. **Interpretação de Ensaios Defletométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1996.

MALYSZ, R. **Comportamento mecânico de britas empregadas em pavimento**. 2004 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MARQUES, G. L. O. **Estabilização dos Solos para Fins de Pavimentação**. Notas de Aula, Capítulo 4. Juiz de Fora, 2009.

Medina, J. Apostila de estabilização de solos – COPPE/UFRJ. 1987. Medina, J.; Motta, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª Edição. Editora da UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil. 2005.

MEDINA, J., MOTTA, M. G. **Mecânica dos pavimentos. Volume 2**. 2006. Rio de Janeiro

MEDINA, J. **Apostila de estabilização de solos** – COPPE/UFRJ. 1987.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª Edição. Editora UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil. 2005.

MOREIRA, J. P. V; GOMES, A. C; PEREIRA, P. **Contribuição para a reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento**. Lisboa, 2006

Mourão, F. **Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA**. Trabalho de conclusão de curso de mestrado em engenharia em civil. **Universidade do Rio de Janeiro – COPPE**. Rio de Janeiro – RJ, 2003.

NASCIMENTO, L. A. H., **Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

NASCIMENTO, R.R., **Utilização de agregados de argila calcinada em pavimentação: uma alternativa para o estado do Acre**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

Oliveira, R. **Análise de dois solos modificados com cimento para dimensionamento de pavimentos**. Trabalho de conclusão de curso de mestrado em engenharia em civil. **Universidade do Rio de Janeiro – COPPE**. Rio de Janeiro – RJ, 2011.

PATRIOTA, M.B. **Análise Laboratorial de Concreto Betuminoso Usinado a Quente Modificado com Adição de Borracha Reciclada de Pneus – Processo Seco**. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2004.

PINTO, I. E. **Estudo das características físicas e mecânicas de misturas recicladas com espuma de asfalto**. São Paulo, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 209p.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. ED. COPIARTE. Rio de Janeiro, 2002.

PINTO, S., 1991, **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PORTER, O. J. **Development of the original method for highway**. Transactions. ASCE. Vol 115, 1929.

PREUSSLER, E.S. **Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço**. Tese de D.Sc.. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1983.

RAMOS, C.R., 2003, **Estudo para o desenvolvimento de um catálogo de pavimentos flexíveis do município do RJ**, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RICCI, G. **Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e de demolição para pavimentação**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2007.

SANTOS, M., LIMA, D., BUENO, B., “**Estabilização dos solos com cal e betume**”. In: 6º Reunião de pavimentação urbana, pp.74 – 97, Santos – São Paulo, Abril, 1995.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 1ªed. São Paulo, v.1, p.746, 1997.

SILVA, P.D.E.A. **Estudo do reforço de controle de cimento Portland (Whitetopping) na pista circular experimental do Instituto de Pesquisas Rodoviárias**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2001.

SULLIVAN, K. A. O., 2009, “**The effects of warm mix asphalt additives on recycled asphalt pavement**” dissertação (bacharel em ciências) Worcester Pavement Institute, Worcester. 84f.

SVENSON, M. **Ensaio triaxiais dinâmicos de solos argilosos**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1980.

Santana, H. **Manual de pré- misturados a frio**. Instituto Brasileiro de Petróleo. Rio de Janeiro, 1993. 298p.

SOLIZ, V. V. P., **Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

SILVA, C.L. **Análise da Tectônica Cenozóica na Região de Manaus e Adjacências**. Tese de Doutorado. UNESP. Ano de obtenção: 2005.

Tavares, D. **AValiação Laboratorial de Mistura Asfáltica do Tipo SMA com Agregado Siderúrgico**. Trabalho de conclusão de curso de mestrado em engenharia em civil. **Universidade do Rio de Janeiro – COPPE. Rio de Janeiro – RJ, 2012.**

VOGT, J.C., Estabilização Betuminosa. In: 7º Simpósio sobre pesquisas rodoviárias, Rio de Janeiro. Julho 1971.

Vizcarra, G. **Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos**. Trabalho de conclusão de curso de mestrado em engenharia em civil. Universidade Católica do Rio de Janeiro – RJ, 2010.

WIRTGEN. **Manual de reciclagem a frio**. 2ª ed. 2004. Wirtgen GmbH. Alemanha.

ANEXO 1

RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA
MISTURAS: 60% DE RFA + 40% SOLO + 4% DE CIMENTO

RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\302-2012r.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 40% SN
Rodovia: 60% Mat fres
Operador: Roberto Vianna
Diâmetro C.P.(cm): 10
Altura C.P.(cm): 20

Origem: UFAM
Trecho: 4% Cimento
Interess.: Eduardo
Energia: Mod

C.P. No.: 1207
Est/Km:
Data: 05/06/2012
Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

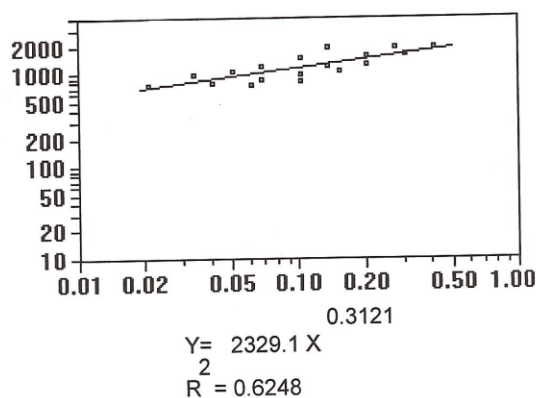
T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.005425	0.000027	759
0.021	0.041	0.010465	0.000052	787
0.021	0.062	0.016272	0.000081	759
0.034	0.034	0.007126	0.000036	963
0.034	0.069	0.016265	0.000081	844
0.034	0.103	0.024826	0.000124	829
0.051	0.051	0.009795	0.000049	1040
0.051	0.103	0.021147	0.000106	973
0.051	0.155	0.030221	0.000151	1025
0.069	0.069	0.011798	0.000059	1163
0.069	0.137	0.023359	0.000117	1175
0.069	0.206	0.033491	0.000168	1229
0.103	0.103	0.013990	0.000070	1471
0.103	0.206	0.026884	0.000135	1531
0.103	0.309	0.038513	0.000193	1603
0.137	0.137	0.014795	0.000074	1855
0.137	0.275	0.029466	0.000147	1862
0.137	0.412	0.044280	0.000222	1859

Def. Cond.: 0.0930 mm

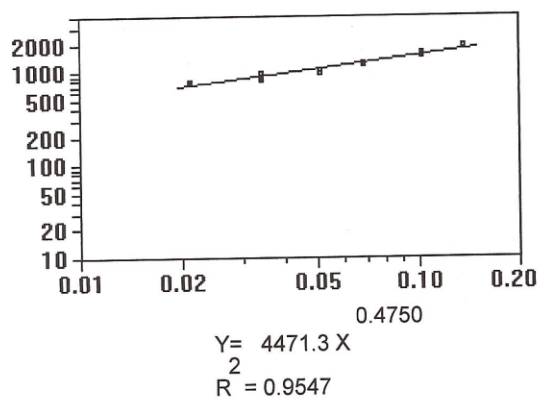
Def. Total: 0.1540 mm

Altura final C.P.: 199.846 mm

Sigma2 (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\301-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 40% Solo	Origem: UFAM	C.P. No.: 1207
Rodovia: 60% RC	Trecho: 4% Cimento	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 05/06/2012
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: Mod	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

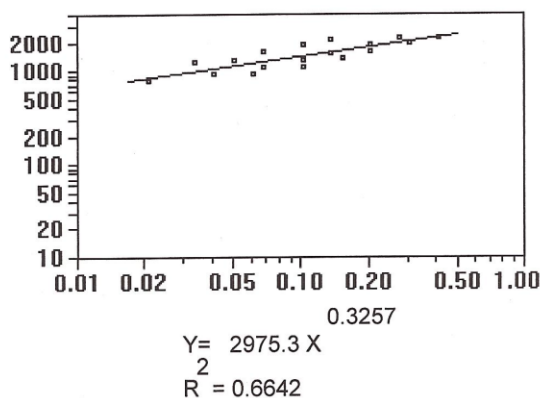
T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.005219	0.000026	787
0.021	0.041	0.008973	0.000045	915
0.021	0.062	0.013426	0.000067	918
0.034	0.034	0.005484	0.000027	1248
0.034	0.069	0.012806	0.000064	1069
0.034	0.103	0.019009	0.000095	1080
0.051	0.051	0.007762	0.000039	1310
0.051	0.103	0.015996	0.000080	1284
0.051	0.155	0.023139	0.000116	1336
0.069	0.069	0.008554	0.000043	1601
0.069	0.137	0.018214	0.000091	1504
0.069	0.206	0.026015	0.000130	1579
0.103	0.103	0.011037	0.000055	1861
0.103	0.206	0.021887	0.000110	1877
0.103	0.309	0.031326	0.000157	1967
0.137	0.137	0.012779	0.000064	2143
0.137	0.275	0.024702	0.000124	2217
0.137	0.412	0.037496	0.000188	2191

Def. Cond.: 0.5220 mm

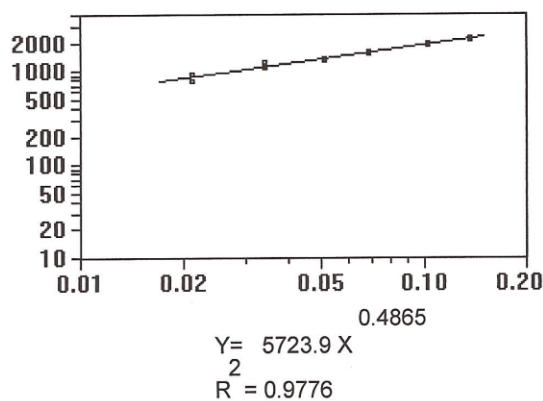
Def. Total: 0.5360 mm

Altura final C.P.: 199.464 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\300-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 4% cimento	Origem: UFAM	C.P. No.: 1207
Rodovia: 60%	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 31/05/2012
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: Mod	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

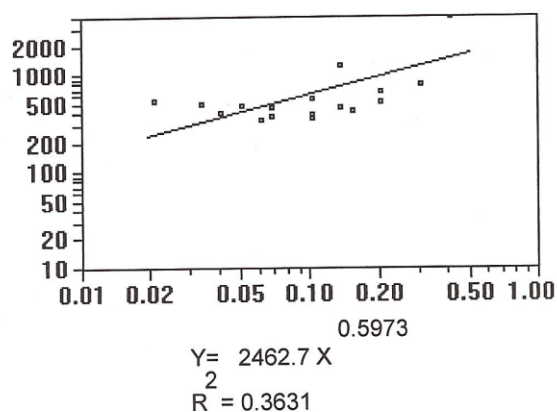
T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.007691	0.000039	534
0.021	0.041	0.020507	0.000103	401
0.021	0.062	0.036747	0.000184	335
0.034	0.034	0.014066	0.000071	487
0.034	0.069	0.036678	0.000184	373
0.034	0.103	0.058910	0.000295	349
0.051	0.051	0.021118	0.000106	482
0.051	0.103	0.053343	0.000267	385
0.051	0.155	0.074194	0.000372	417
0.069	0.069	0.030188	0.000151	454
0.069	0.137	0.060437	0.000303	453
0.069	0.206	0.079890	0.000401	514
0.103	0.103	0.037240	0.000187	551
0.103	0.206	0.062122	0.000312	661
0.103	0.309	0.078109	0.000392	789
0.137	0.137	0.021880	0.000110	1251
0.137	0.275	0.009563	0.000048	5730
0.137	0.412	0.020674	0.000104	3976

Def. Cond.: 0.4500 mm

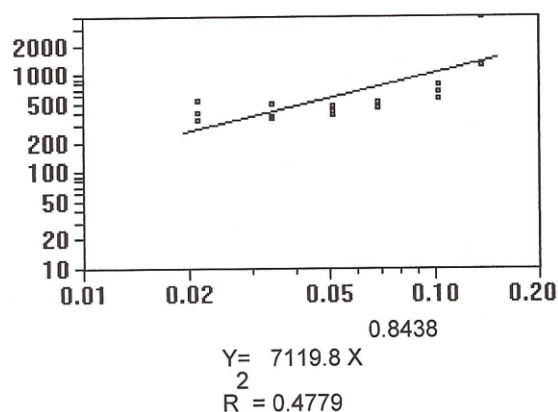
Def. Total: 0.4500 mm

Altura final C.P.: 199.550 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



ANEXO 2

RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA
MISTURAS: 60% DE RFA + 40% SOLO + 2% DE CIMENTO

RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\295-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 2%cimento	Origem: UFAM	C.P. No.: 1206
Rodovia: 60%	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 31/05/2012
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: Mod	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

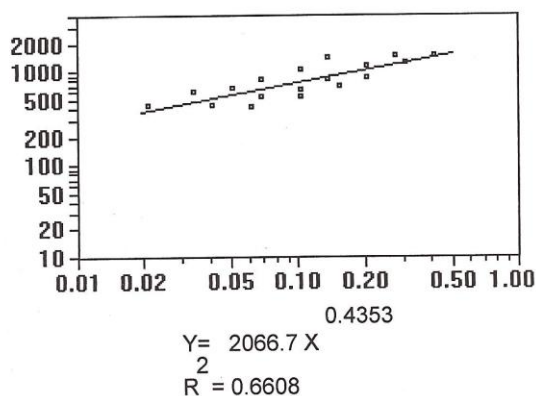
T. Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.009473	0.000048	434
0.021	0.041	0.019173	0.000096	428
0.021	0.062	0.030086	0.000151	409
0.034	0.034	0.011408	0.000057	600
0.034	0.069	0.025538	0.000128	536
0.034	0.103	0.038955	0.000195	527
0.051	0.051	0.015337	0.000077	663
0.051	0.103	0.032108	0.000161	639
0.051	0.155	0.044959	0.000226	687
0.069	0.069	0.017111	0.000086	800
0.069	0.137	0.033434	0.000168	819
0.069	0.206	0.047526	0.000238	864
0.103	0.103	0.019328	0.000097	1062
0.103	0.206	0.036306	0.000182	1131
0.103	0.309	0.050554	0.000254	1218
0.137	0.137	0.019308	0.000097	1417
0.137	0.275	0.037337	0.000187	1466
0.137	0.412	0.055612	0.000279	1476

Def. Cond.: 0.5220 mm

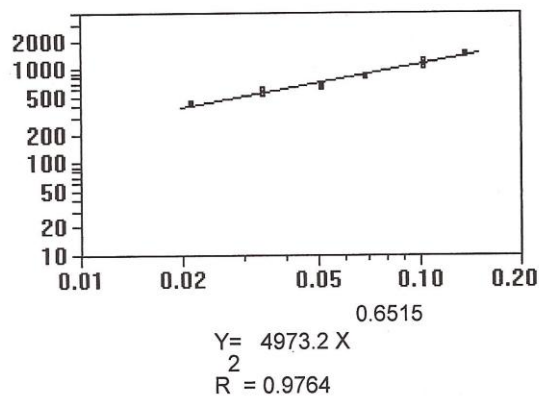
Def. Total: 0.7050 mm

Altura final C.P.: 199.295 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\296-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 2%cimento	Origem: UFAM	C.P. No.: 1206
Rodovia: 60%	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 31/05/2012
Diametro C.P.(cm): 10	Energia: Mod	Dist. Apoios(mm): 200
Altura C.P.(cm): 20		

TABELA DE RESULTADOS

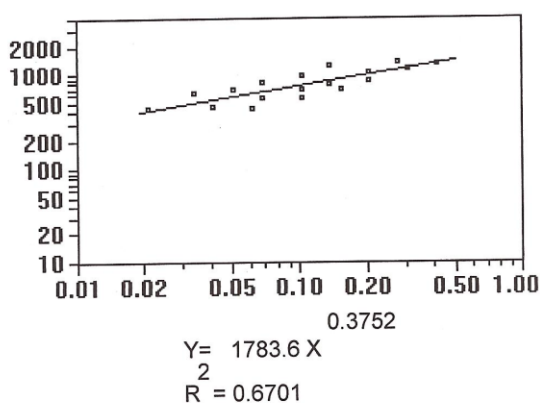
T. Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.009444	0.000047	436
0.021	0.041	0.018023	0.000090	456
0.021	0.062	0.028744	0.000144	429
0.034	0.034	0.010828	0.000054	633
0.034	0.069	0.024235	0.000121	566
0.034	0.103	0.037083	0.000186	554
0.051	0.051	0.014513	0.000073	702
0.051	0.103	0.030364	0.000152	677
0.051	0.155	0.044098	0.000221	702
0.069	0.069	0.016551	0.000083	828
0.069	0.137	0.034583	0.000173	793
0.069	0.206	0.048750	0.000244	843
0.103	0.103	0.021234	0.000106	968
0.103	0.206	0.038740	0.000194	1061
0.103	0.309	0.053815	0.000270	1146
0.137	0.137	0.022487	0.000113	1219
0.137	0.275	0.041595	0.000208	1318
0.137	0.412	0.062746	0.000314	1310

Def. Cond.: 0.2330 mm

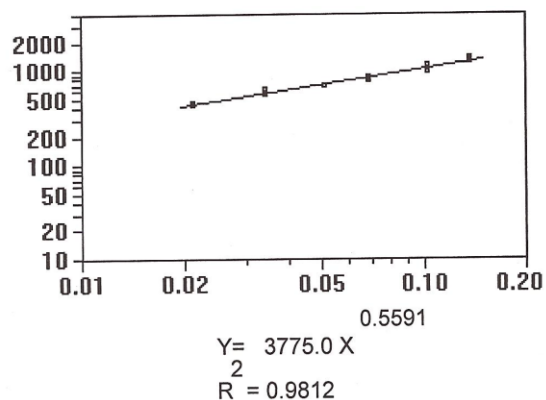
Def. Total: 0.4010 mm

Altura final C.P.: 199.599 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\297-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 60% Solo	Origem: UFAM	C.P. No.: 120
Rodovia: 40% RC	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 05/06/2012
Diametro C.P.(cm): 10	Energia: Mod	Dist. Apoios(mm): 200
Altura C.P.(cm): 20		

TABELA DE RESULTADOS

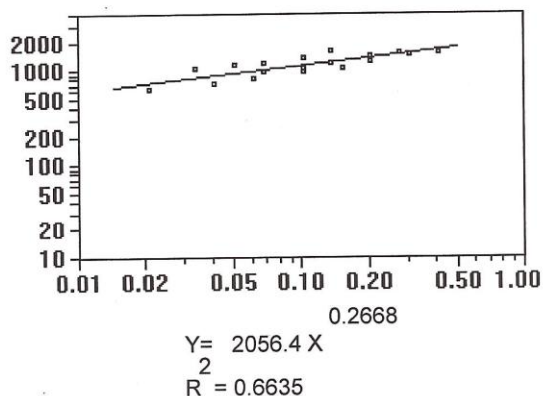
T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.006575	0.000033	625
0.021	0.041	0.011213	0.000056	733
0.021	0.062	0.015343	0.000077	804
0.034	0.034	0.006623	0.000033	1034
0.034	0.069	0.014336	0.000072	956
0.034	0.103	0.021165	0.000106	971
0.051	0.051	0.008851	0.000044	1150
0.051	0.103	0.019521	0.000098	1053
0.051	0.155	0.028971	0.000145	1067
0.069	0.069	0.011326	0.000057	1210
0.069	0.137	0.023333	0.000117	1174
0.069	0.206	0.033507	0.000168	1227
0.103	0.103	0.015158	0.000076	1356
0.103	0.206	0.029397	0.000147	1398
0.103	0.309	0.042502	0.000213	1450
0.137	0.137	0.017356	0.000087	1578
0.137	0.275	0.035346	0.000177	1550
0.137	0.412	0.052972	0.000265	1551

Def. Cond.: 0.4120 mm

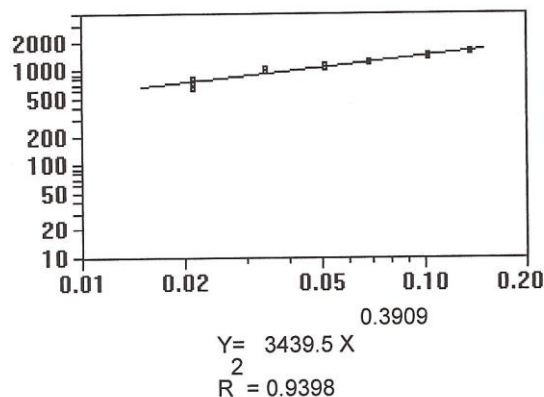
Def. Total: 0.4740 mm

Altura final C.P.: 199.526 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



ANEXO 3
RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA
MISTURAS: 60% DE RFA + 40% SOLO

RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\293-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 40% SN	Origem: UFAM	C.P. No.: 1205
Rodovia: 60% Mat fres	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 05/06/2012
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: Mod	Dist. Apoios(mm): 200

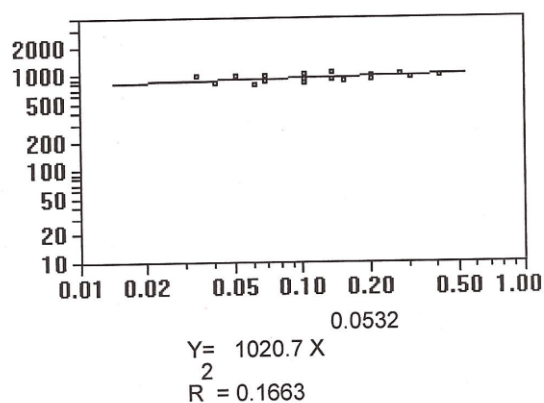
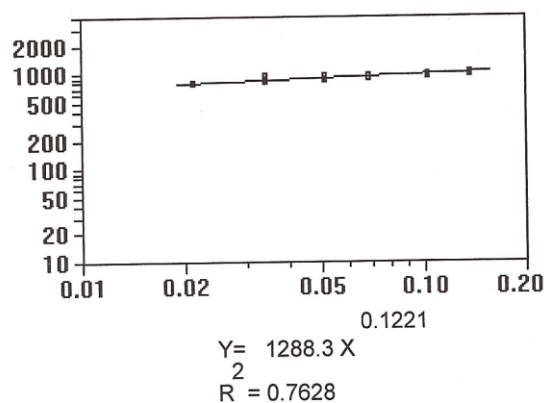
TABELA DE RESULTADOS

T. Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Especifica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021			
0.021	0.041	0.010237	0.000051	804
0.021	0.062	0.015678	0.000078	788
0.034	0.034	0.007146	0.000036	960
0.034	0.069	0.016476	0.000082	833
0.034	0.103	0.025137	0.000126	819
0.051	0.051	0.010749	0.000054	949
0.051	0.103	0.023584	0.000118	873
0.051	0.155	0.035824	0.000179	865
0.069	0.069	0.014376	0.000072	955
0.069	0.137	0.030404	0.000152	903
0.069	0.206	0.046207	0.000231	891
0.103	0.103	0.020479	0.000102	1005
0.103	0.206	0.042960	0.000215	958
0.103	0.309	0.066004	0.000330	936
0.137	0.137	0.025987	0.000130	1056
0.137	0.275	0.054473	0.000273	1008
0.137	0.412	0.084164	0.000421	978

Def. Cond.: 0.0530 mm

Def. Total: 0.1270 mm

Altura final C.P.: 199.873 mm

Sigma_d (MPa) x M.R.(MPa)Sigma₃ (MPa) x M.R.(MPa)

RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\292-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: Mat fresado	Origem: UFAM	C.P. No.: 1205
Rodovia: 60%	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 31/05/2012
Diametro C.P.(cm): 10	Energia: Mod	Dist. Apoios(mm): 200
Altura C.P.(cm): 20		

TABELA DE RESULTADOS

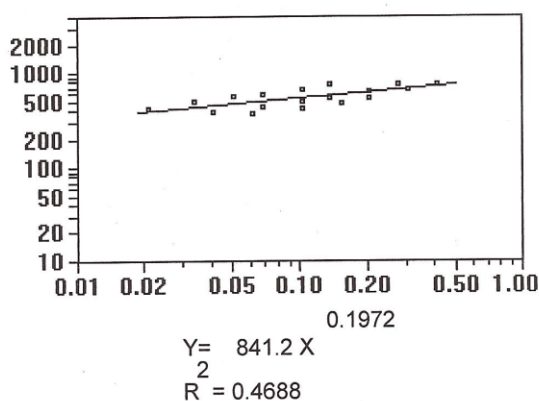
T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.009665	0.000048	425
0.021	0.041	0.021113	0.000106	389
0.021	0.062	0.033300	0.000167	370
0.034	0.034	0.013669	0.000069	501
0.034	0.069	0.031886	0.000160	429
0.034	0.103	0.049592	0.000249	414
0.051	0.051	0.018518	0.000093	549
0.051	0.103	0.042127	0.000211	487
0.051	0.155	0.064665	0.000324	478
0.069	0.069	0.023492	0.000118	583
0.069	0.137	0.050303	0.000252	544
0.069	0.206	0.075870	0.000381	541
0.103	0.103	0.030647	0.000154	670
0.103	0.206	0.064320	0.000323	638
0.103	0.309	0.092259	0.000463	667
0.137	0.137	0.036159	0.000181	757
0.137	0.275	0.072462	0.000364	755
0.137	0.412	0.110196	0.000553	745

Def. Cond.: 0.5230 mm

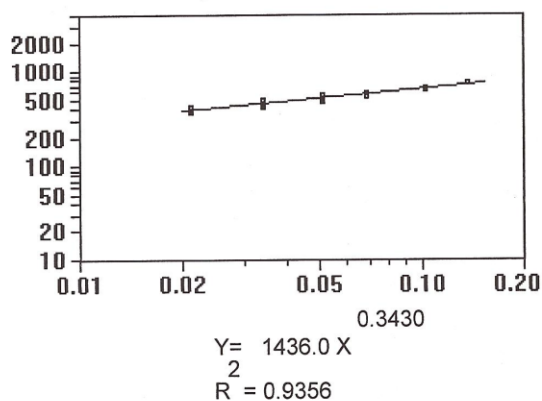
Def. Total: 0.6940 mm

Altura final C.P.: 199.306 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\291-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: Mat fresado
Rodovia: 60%
Operador: Roberto Vianna
Diâmetro C.P.(cm): 10
Altura C.P.(cm): 20

Origem: UFAM
Trecho:
Interess.: Eduardo
Energia: Mod

C.P. No.: 1205
Est/Km:
Data: 31/05/2012
Dist. Apoios(mm): 200

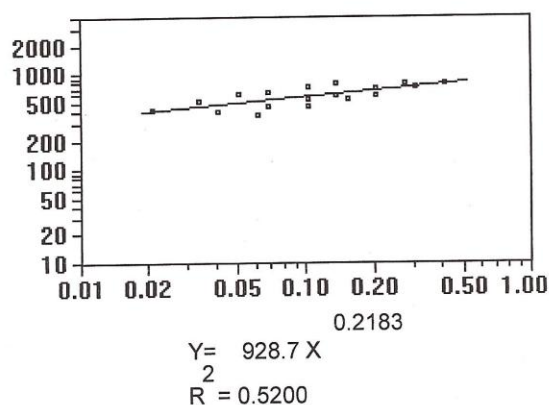
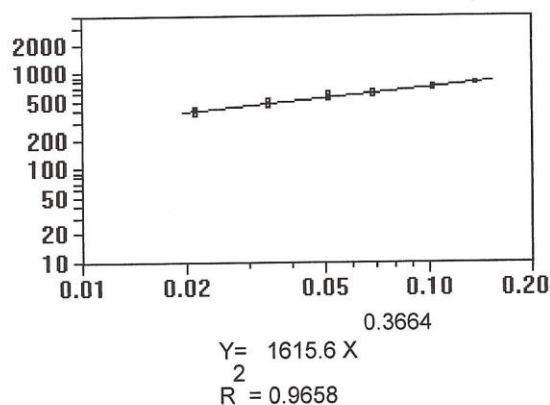
TABELA DE RESULTADOS

T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.009993	0.000050	411
0.021	0.041	0.020987	0.000105	392
0.021	0.062	0.033392	0.000167	369
0.034	0.034	0.013467	0.000068	508
0.034	0.069	0.030526	0.000153	449
0.034	0.103	0.046215	0.000232	445
0.051	0.051	0.016951	0.000085	600
0.051	0.103	0.037702	0.000189	545
0.051	0.155	0.058891	0.000295	525
0.069	0.069	0.021488	0.000108	637
0.069	0.137	0.046797	0.000235	585
0.069	0.206	0.070753	0.000355	581
0.103	0.103	0.029042	0.000146	707
0.103	0.206	0.060170	0.000302	683
0.103	0.309	0.086886	0.000436	709
0.137	0.137	0.035301	0.000177	776
0.137	0.275	0.069443	0.000348	789
0.137	0.412	0.105964	0.000531	775

Def. Cond.: 0.4320 mm

Def. Total: 0.5770 mm

Altura final C.P.: 199.423 mm

Sigma_d (MPa) x M.R.(MPa)Sigma₃ (MPa) x M.R.(MPa)

ANEXO 4
RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA
MISTURAS: 40% DE RFA + 60% SOLO

RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\290-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 60%SI Nat.	Origem: UFAM	C.P. No.: 1204
Rodovia: 40% Mat fres	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 11/06/2012
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: Mod	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

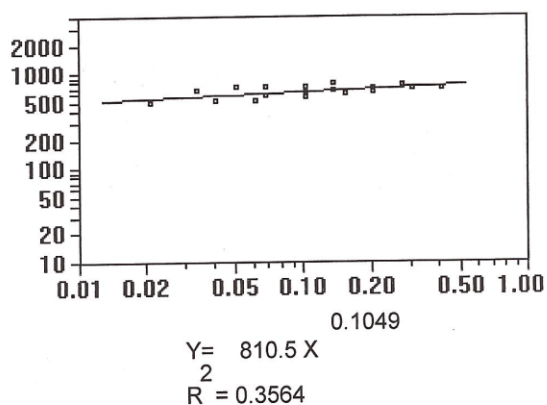
T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Especifica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.008516	0.000043	483
0.021	0.041	0.015805	0.000079	520
0.021	0.062	0.024366	0.000122	506
0.034	0.034	0.010584	0.000053	647
0.034	0.069	0.023838	0.000119	575
0.034	0.103	0.036774	0.000184	559
0.051	0.051	0.014477	0.000073	703
0.051	0.103	0.032246	0.000162	637
0.051	0.155	0.051616	0.000259	599
0.069	0.069	0.018861	0.000095	726
0.069	0.137	0.041722	0.000209	657
0.069	0.206	0.063751	0.000319	645
0.103	0.103	0.028314	0.000142	726
0.103	0.206	0.058575	0.000294	702
0.103	0.309	0.088033	0.000441	700
0.137	0.137	0.035415	0.000177	774
0.137	0.275	0.072388	0.000363	757
0.137	0.412	0.117698	0.000590	698

Def. Cond.: 0.3640 mm

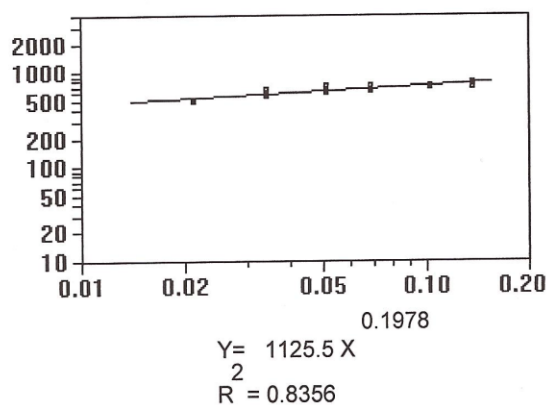
Def. Total: 0.4910 mm

Altura final C.P.: 199.509 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\288-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: Mat fresado	Origem: UFAM	C.P. No.: 1204
Rodovia: 40%	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 31/05/2012
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: Mod	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

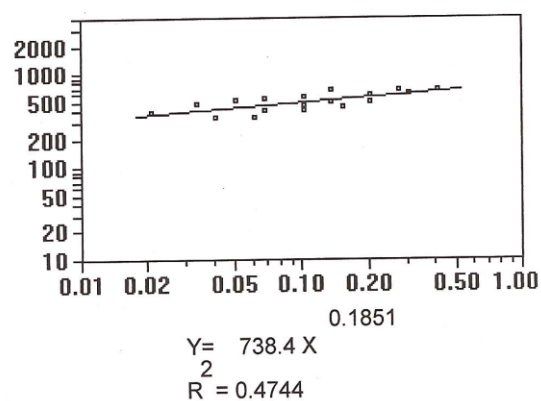
T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.010805	0.000054	381
0.021	0.041	0.024203	0.000121	340
0.021	0.062	0.036669	0.000184	336
0.034	0.034	0.014507	0.000073	472
0.034	0.069	0.034333	0.000172	399
0.034	0.103	0.052121	0.000261	394
0.051	0.051	0.019981	0.000100	509
0.051	0.103	0.045313	0.000227	454
0.051	0.155	0.070743	0.000354	437
0.069	0.069	0.025611	0.000128	535
0.069	0.137	0.056750	0.000284	483
0.069	0.206	0.083154	0.000417	494
0.103	0.103	0.036824	0.000185	558
0.103	0.206	0.071383	0.000358	576
0.103	0.309	0.103488	0.000519	596
0.137	0.137	0.041622	0.000209	658
0.137	0.275	0.082027	0.000411	668
0.137	0.412	0.127077	0.000637	647

Def. Cond.: 0.3060 mm

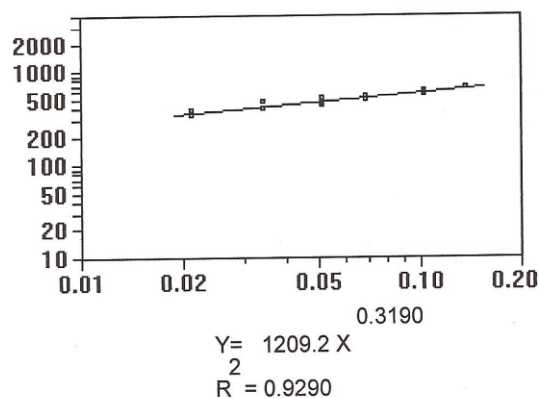
Def. Total: 0.4510 mm

Altura final C.P.: 199.549 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\287-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: Mat fresado	Origem: UFAM	C.P. No.: 1204
Rodovia: 40%	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 31/05/2012
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: Mod	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

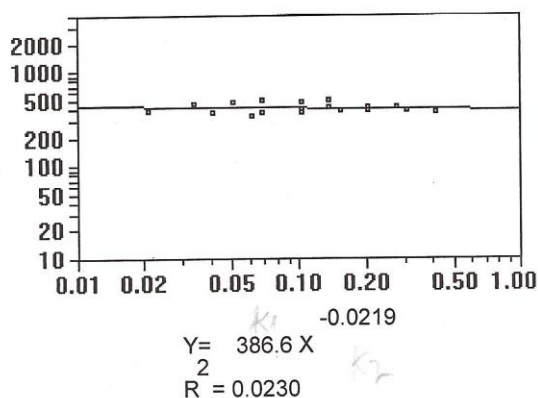
T. Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Especifica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.010553	0.000053	389
0.021	0.041	0.021986	0.000110	373
0.021	0.062	0.036600	0.000184	336
0.034	0.034	0.014927	0.000075	458
0.034	0.069	0.036922	0.000185	370
0.034	0.103	0.056891	0.000286	360
0.051	0.051	0.021447	0.000108	473
0.051	0.103	0.050566	0.000254	405
0.051	0.155	0.081839	0.000411	377
0.069	0.069	0.027851	0.000140	491
0.069	0.137	0.066396	0.000334	412
0.069	0.206	0.109464	0.000550	375
0.103	0.103	0.043143	0.000217	475
0.103	0.206	0.100063	0.000503	410
0.103	0.309	0.160648	0.000807	383
0.137	0.137	0.055695	0.000280	491
0.137	0.275	0.130361	0.000655	419
0.137	0.412	0.224819	0.001130	364

Def. Cond.: 0.8320 mm

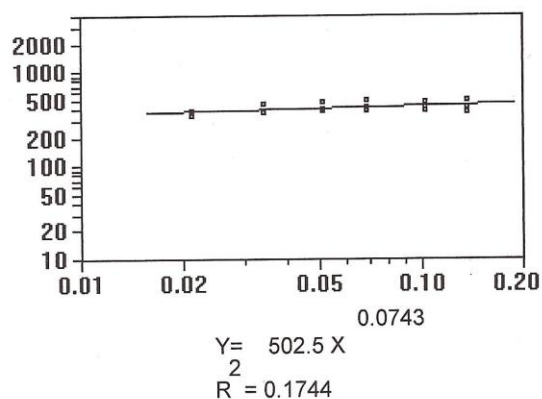
Def. Total: 1.0610 mm

Altura final C.P.: 198.939 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



ANEXO 5
RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA
MISTURAS: 20% DE RFA + 80% SOLO

RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\285-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 80% Solo	Origem: UFAM	C.P. No.: 1203
Rodovia: 20% RC	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 05/06/2012
Diametro C.P.(cm): 10	Energia: Mod	Dist. Apoios(mm): 200
Altura C.P.(cm): 20		

TABELA DE RESULTADOS

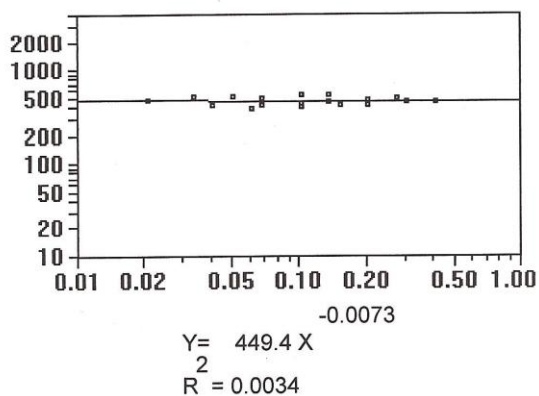
T. Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Especifica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.008820	0.000044	466
0.021	0.041	0.019545	0.000098	420
0.021	0.062	0.031882	0.000160	387
0.034	0.034	0.013506	0.000068	507
0.034	0.069	0.032525	0.000163	421
0.034	0.103	0.052015	0.000261	395
0.051	0.051	0.019583	0.000098	520
0.051	0.103	0.046578	0.000233	441
0.051	0.155	0.075469	0.000378	410
0.069	0.069	0.027300	0.000137	502
0.069	0.137	0.061326	0.000307	447
0.069	0.206	0.097796	0.000490	420
0.103	0.103	0.039134	0.000196	525
0.103	0.206	0.088460	0.000443	464
0.103	0.309	0.136435	0.000684	452
0.137	0.137	0.050526	0.000253	542
0.137	0.275	0.111406	0.000559	492
0.137	0.412	0.181203	0.000909	453

Def. Cond.: 0.4360 mm

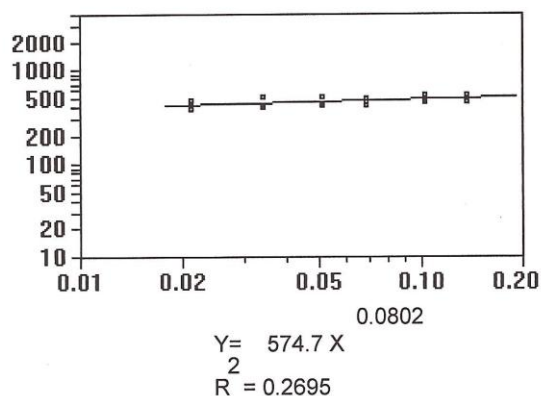
Def. Total: 0.5840 mm

Altura final C.P.: 199.416 mm

Sigma (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\284-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: ,	Origem: UFAM	C.P. No.: 1202
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 30/05/2012
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: Mod	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

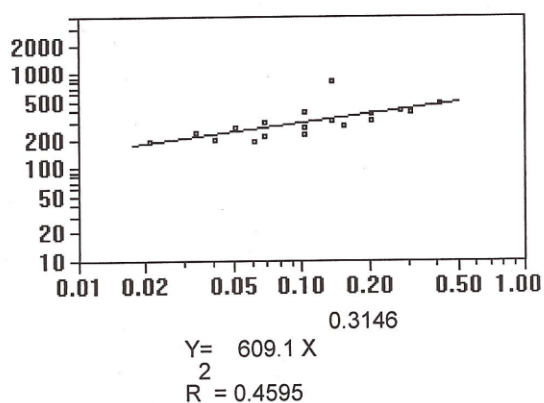
T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.021468	0.000108	191
0.021	0.041	0.042449	0.000213	193
0.021	0.062	0.067068	0.000336	184
0.034	0.034	0.029018	0.000146	236
0.034	0.069	0.063091	0.000317	217
0.034	0.103	0.093593	0.000470	219
0.051	0.051	0.038533	0.000193	264
0.051	0.103	0.077802	0.000390	264
0.051	0.155	0.111164	0.000558	278
0.069	0.069	0.045432	0.000228	301
0.069	0.137	0.088581	0.000445	309
0.069	0.206	0.129594	0.000650	317
0.103	0.103	0.053087	0.000267	386
0.103	0.206	0.109763	0.000551	374
0.103	0.309	0.158250	0.000794	389
0.137	0.137	0.033741	0.000169	811
0.137	0.275	0.139544	0.000700	392
0.137	0.412	0.174714	0.000877	470

Def. Cond.: 0.5900 mm

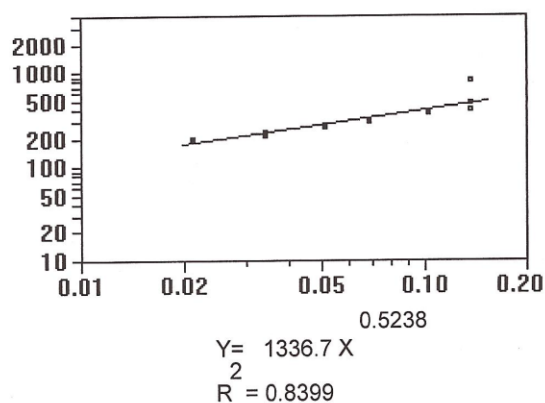
Def. Total: 0.7620 mm

Altura final C.P.: 199.238 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\283-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: ,	Origem: UFAM	C.P. No.: 1202
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 30/05/2012
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: Mod	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

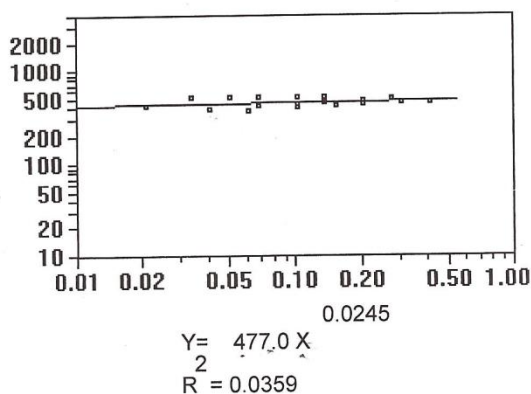
T. Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.009938	0.000050	413
0.021	0.041	0.021602	0.000108	380
0.021	0.062	0.033003	0.000166	373
0.034	0.034	0.013428	0.000067	510
0.034	0.069	0.032572	0.000163	420
0.034	0.103	0.050635	0.000254	405
0.051	0.051	0.019780	0.000099	514
0.051	0.103	0.046589	0.000234	441
0.051	0.155	0.073627	0.000369	420
0.069	0.069	0.026794	0.000134	511
0.069	0.137	0.061192	0.000307	447
0.069	0.206	0.094615	0.000475	434
0.103	0.103	0.040368	0.000203	508
0.103	0.206	0.088497	0.000444	464
0.103	0.309	0.133975	0.000672	460
0.137	0.137	0.052914	0.000265	517
0.137	0.275	0.112117	0.000563	488
0.137	0.412	0.178415	0.000895	460

Def. Cond.: 0.5660 mm

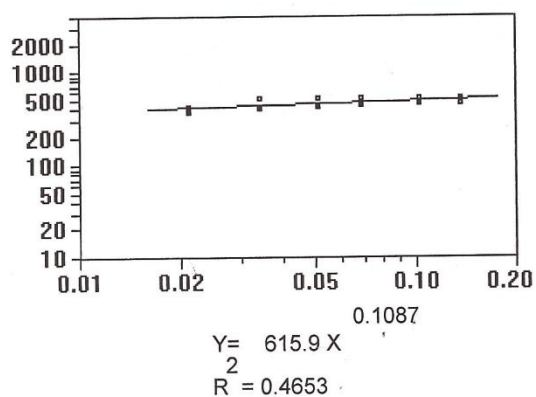
Def. Total: 0.7210 mm

Altura final C.P.: 199.279 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



ANEXO 6
RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA
AMOSTRAS: SOLO DE REFERENCIA

RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\279-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: Solo Natural	Origem: UFAM	C.P. No.: 1202
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 30/05/2012
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: Mod	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

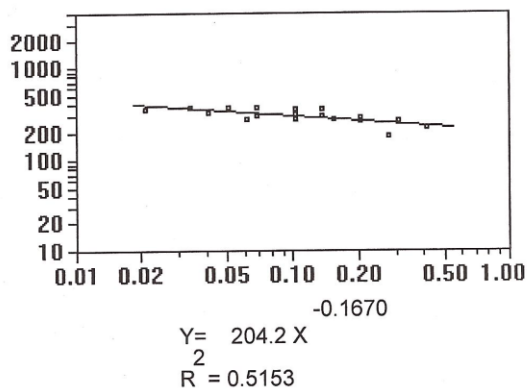
T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.011416	0.000057	358
0.021	0.041	0.025471	0.000128	321
0.021	0.062	0.045543	0.000229	270
0.034	0.034	0.018500	0.000093	369
0.034	0.069	0.045423	0.000229	300
0.034	0.103	0.073381	0.000369	279
0.051	0.051	0.027400	0.000138	370
0.051	0.103	0.066991	0.000337	305
0.051	0.155	0.112886	0.000568	273
0.069	0.069	0.037856	0.000191	360
0.069	0.137	0.089938	0.000453	303
0.069	0.206	0.153285	0.000772	267
0.103	0.103	0.057097	0.000287	358
0.103	0.206	0.141089	0.000710	290
0.103	0.309	0.229317	0.001155	268
0.137	0.137	0.077838	0.000392	350
0.137	0.275	0.299395	0.001513	181
0.137	0.412	0.360473	0.001823	226

Def. Cond.: 1.2720 mm

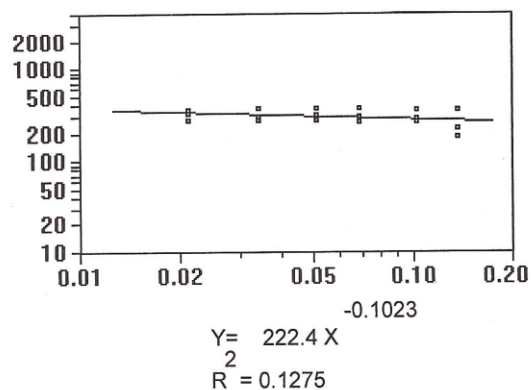
Def. Total: 2.3040 mm

Altura final C.P.: 197.696 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\281-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: SI Nat.	Origem: UFAM	C.P. No.: 1204
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 11/06/2012
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: Mod	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

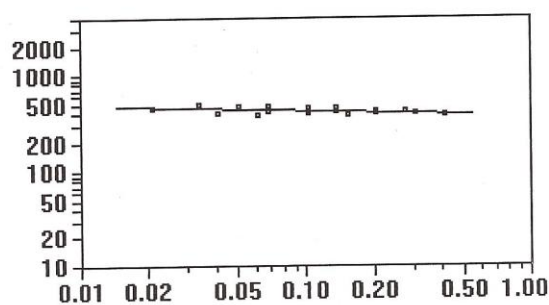
T. Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.009066	0.000045	453
0.021	0.041	0.020437	0.000102	402
0.021	0.062	0.032564	0.000163	379
0.034	0.034	0.013657	0.000068	502
0.034	0.069	0.033009	0.000165	415
0.034	0.103	0.052589	0.000263	391
0.051	0.051	0.021215	0.000106	480
0.051	0.103	0.049254	0.000247	417
0.051	0.155	0.079590	0.000399	389
0.069	0.069	0.028841	0.000144	475
0.069	0.137	0.065395	0.000328	419
0.069	0.206	0.104408	0.000523	394
0.103	0.103	0.045025	0.000226	456
0.103	0.206	0.099420	0.000498	413
0.103	0.309	0.153038	0.000767	403
0.137	0.137	0.060169	0.000301	455
0.137	0.275	0.129869	0.000651	422
0.137	0.412	0.219347	0.001099	375

Def. Cond.: 0.3430 mm

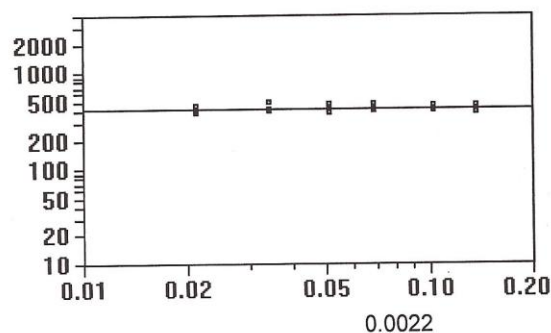
Def. Total: 0.4420 mm

Altura final C.P.: 199.558 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\PROT\280-2012.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 02	Origem: UFAM	C.P. No.: 1202
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 30/05/2012
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: Mod	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

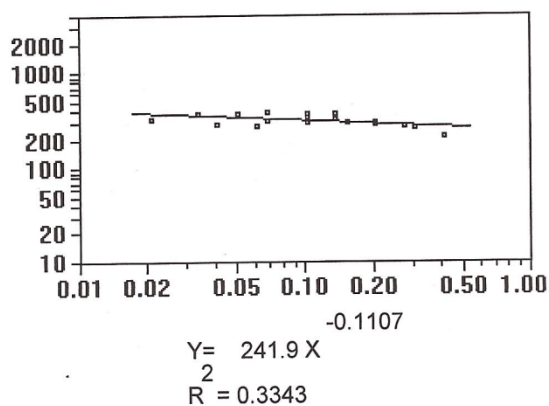
T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Especifica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.012846	0.000065	319
0.021	0.041	0.028100	0.000141	291
0.021	0.062	0.044292	0.000223	277
0.034	0.034	0.018486	0.000093	369
0.034	0.069	0.043812	0.000220	312
0.034	0.103	0.067766	0.000341	302
0.051	0.051	0.027249	0.000137	372
0.051	0.103	0.060890	0.000306	336
0.051	0.155	0.102257	0.000514	301
0.069	0.069	0.035856	0.000180	381
0.069	0.137	0.083869	0.000422	325
0.069	0.206	0.142577	0.000717	287
0.103	0.103	0.055865	0.000281	366
0.103	0.206	0.134918	0.000679	303
0.103	0.309	0.235069	0.001182	261
0.137	0.137	0.073221	0.000369	372
0.137	0.275	0.201399	0.001016	270
0.137	0.412	0.389901	0.001970	209

Def. Cond.: 1.1000 mm

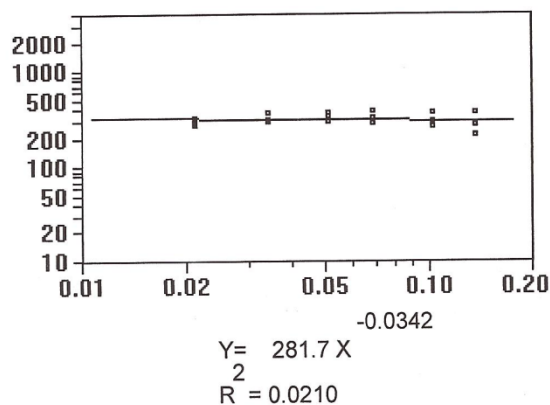
Def. Total: 2.0490 mm

Altura final C.P.: 197.951 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



ANEXO 7

RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA POR
COMPRESSÃO DIAMETRAL

MISTURA ASFÁLTICA: TRAÇO MATERIAL RECICLADO

RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: D:\dados\31-12\18092.dat

DADOS DO ENSAIO

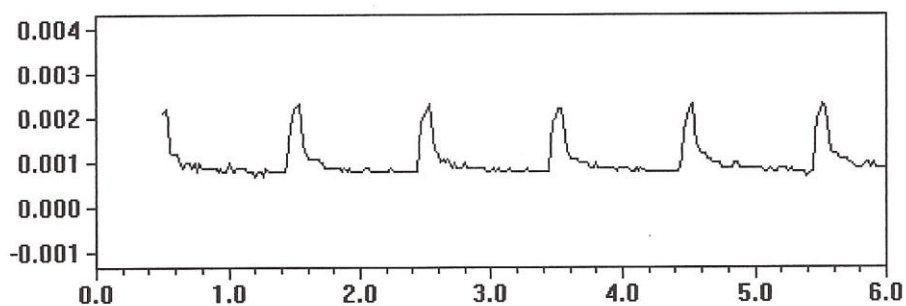
Amostra: UFAM	Origem: Lab UFAM	C.P. No.: 18092
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 05/06/2012
Diâmetro C.P.(cm): 10.13	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 5.83
Observações: (GAB. 1)		

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	216.36	0.002570	8051
CICLO 2 -->	216.72	0.002449	8461
CICLO 3 -->	219.88	0.002489	8448

Valor Médio: 8320 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: D:\dados\31-12\18091.dat

DADOS DO ENSAIO

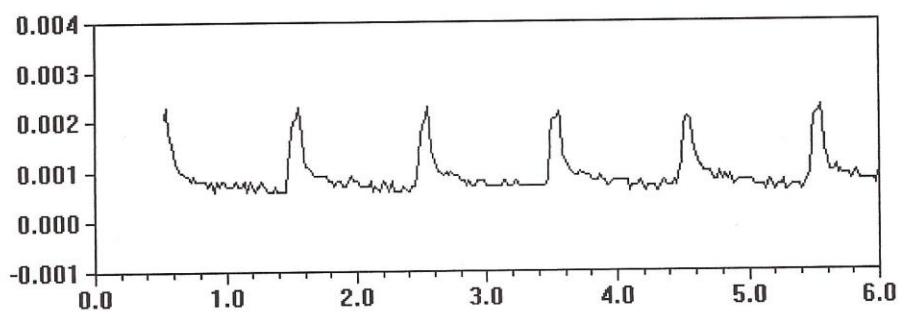
Amostra: UFAM	Origem: Lab UFAM	C.P. No.: 18091
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 05/06/2012
Diâmetro C.P.(cm): 10.15	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 5.85
Observações: (GAB. 1)		

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	249.53	0.002665	8924
CICLO 2 -->	251.92	0.002748	8738
CICLO 3 -->	252.39	0.002677	8984

Valor Médio: 8882 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: D:\dados\31-12\18090.dat

DADOS DO ENSAIO

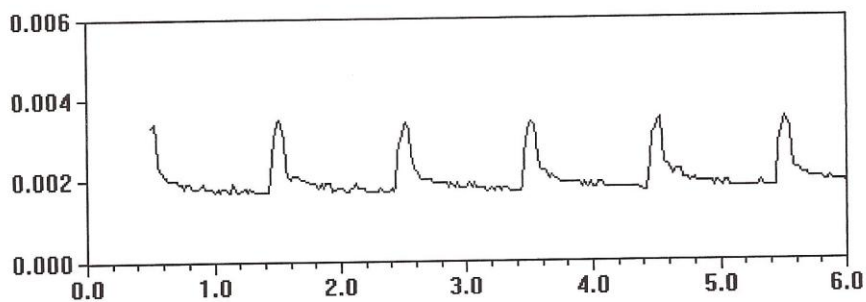
Amostra: UFAM	Origem: Lab UFAM	C.P. No.: 18090
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 05/06/2012
Diâmetro C.P.(cm): 10.17	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 5.86
Observações: (GAB. 1)		

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	217.83	0.002933	7066
CICLO 2 -->	216.95	0.002859	7219
CICLO 3 -->	218.90	0.002940	7084

Valor Médio: 7123 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: D:\dados\30-12\18079.dat

DADOS DO ENSAIO

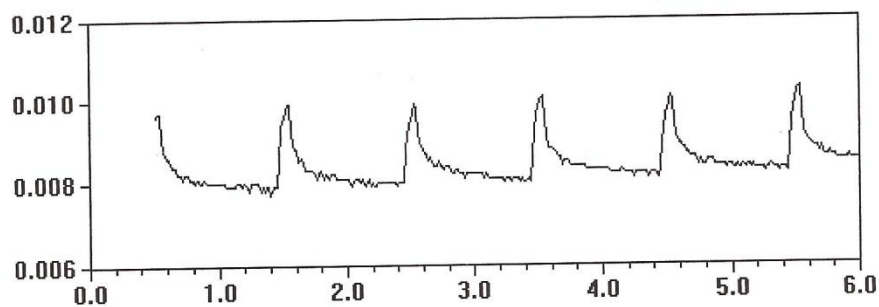
Amostra: UFAM	Origem: Lab UFAM	C.P. No.: 18079
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 04/06/2012
Diâmetro C.P.(cm): 10.15	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 5.91
Observações: (GAB. 1)		

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	87.68	0.003124	2648
CICLO 2 -->	85.80	0.003032	2669
CICLO 3 -->	85.86	0.003117	2598

Valor Médio: 2638 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



ANEXO 8

RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA POR
COMPRESSÃO DIAMETRAL
MISTURA ASFÁLTICA: TRAÇO PADRÃO

RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: D:\dados\30-12\18080.dat

DADOS DO ENSAIO

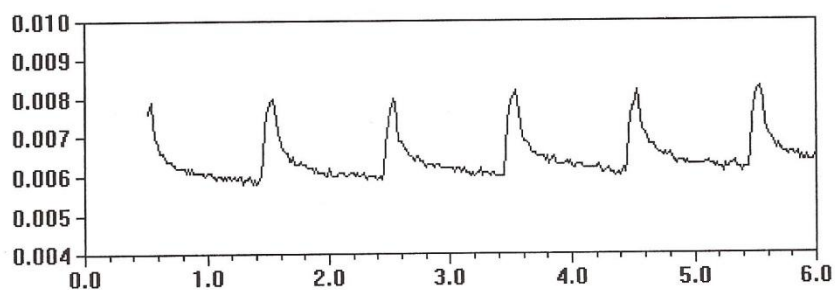
Amostra: UFAM	Origem: Lab UFAM	C.P. No.: 18080
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 04/06/2012
Diâmetro C.P.(cm): 10.15	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 5.91
Observações: (GAB. 1)		

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	120.99	0.003196	3571
CICLO 2 -->	118.33	0.003068	3638
CICLO 3 -->	118.28	0.003199	3488

Valor Médio: 3566 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: D:\dados\30-12\18079.dat

DADOS DO ENSAIO

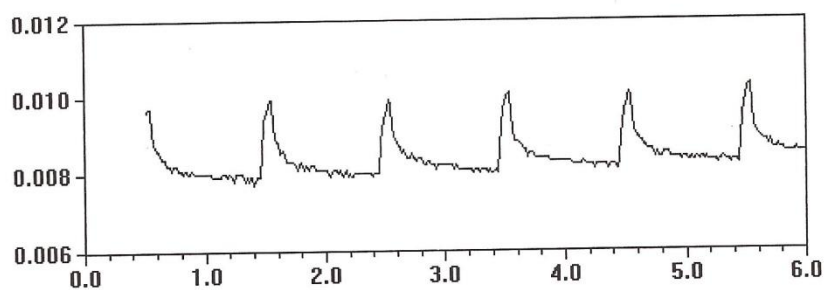
Amostra: UFAM	Origem: Lab UFAM	C.P. No.: 18079
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 04/06/2012
Diâmetro C.P.(cm): 10.15	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 5.91
Observações: (GAB. 1)		

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	87.68	0.003124	2648
CICLO 2 -->	85.80	0.003032	2669
CICLO 3 -->	85.86	0.003117	2598

Valor Médio: 2638 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: D:\dados\30-12\18078.dat

DADOS DO ENSAIO

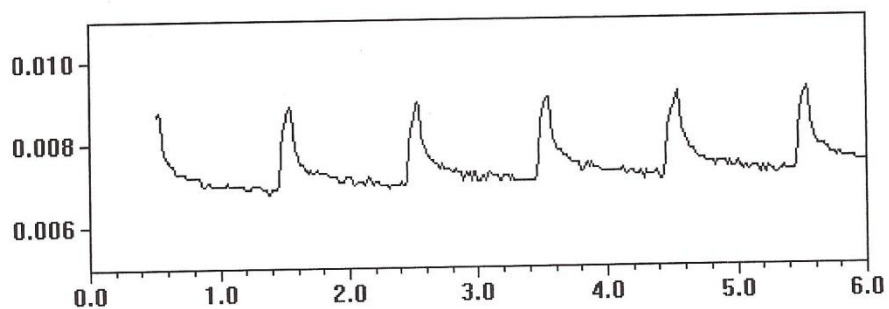
Amostra: UFAM	Origem: Lab UFAM	C.P. No.: 18078
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Eduardo	Data: 04/06/2012
Diâmetro C.P.(cm): 10.15	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 5.89
Observações: (GAB. 1)		

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	86.44	0.003079	2657
CICLO 2 -->	85.90	0.003170	2565
CICLO 3 -->	85.92	0.003135	2595

Valor Médio: 2606 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



ANEXO 9

RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR
COMPRESSÃO DIAMETRAL

MISTURA ASFÁLTICA: TRAÇO MATERIAL RECICLADO E TRAÇO
PADRÃO

Traço Material Reciclado

Amostra:	UFAM				PROTOCOLO:	31-12	
Rodovia:					Origem:	Lab UFAM	
Operador:	ROBERTO VIANNA		Interessado:	Eduardo		Data:	5-jun-12
Cte. do anel dinamométrico	2,053		kgf/div		Após ensaio de módulo (S ou N)		S
Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Leitura do anel (div)	Carga aplicada (kgf)	Resistência à tração estática máxima (MPa)	σ_T MÉDIO	LIGANTE (%)
AMOSTRA APOS ENSAIO							
18090	5,86	10,17	630	1293,2	1,35	1,39	
18091	5,85	10,15	655	1344,5	1,41		
18092	5,83	10,13	643	1319,9	1,39		
TEMPERATURA AMBIENTE DE:						25 °C	

Traço Padrão

Amostra:	UFAM				PROTOCOLO:	30-12	
Rodovia:					Origem:	Lab UFAM	
Operador:	ROBERTO VIANNA		Interessado:	Eduardo		Data:	5-jun-12
Cte. do anel dinamométrico	2,053		kgf/div		Após ensaio de módulo (S ou N)		S
Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Leitura do anel (div)	Carga aplicada (kgf)	Resistência à tração estática máxima (MPa)	σ_T MÉDIO	LIGANTE (%)
AMOSTRA APOS ENSAIO							
18078	5,89	10,15	340	697,9	0,73	0,75	
18079	5,91	10,15	339	695,9	0,72		
18080	5,91	10,15	380	780,0	0,81		
TEMPERATURA AMBIENTE DE:						25 °C	

ANEXO 10

ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

MISTURA ASFÁLTICA: TRAÇO PADRÃO

ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: **UFAM - Mist 5** Protocolo: **30-12**

Temperatura de ensaio: **25** °C Operador(es): **ROBERTO VIANNA**

Módulo resiliente médio da amostra: **2658** MPa Interessado: **Reinaldo**

Resistência máxima à tração estática, σ_{Tmax} : **0,75** MPa Data: **junho/2012**

**PAINEL
PM-1**

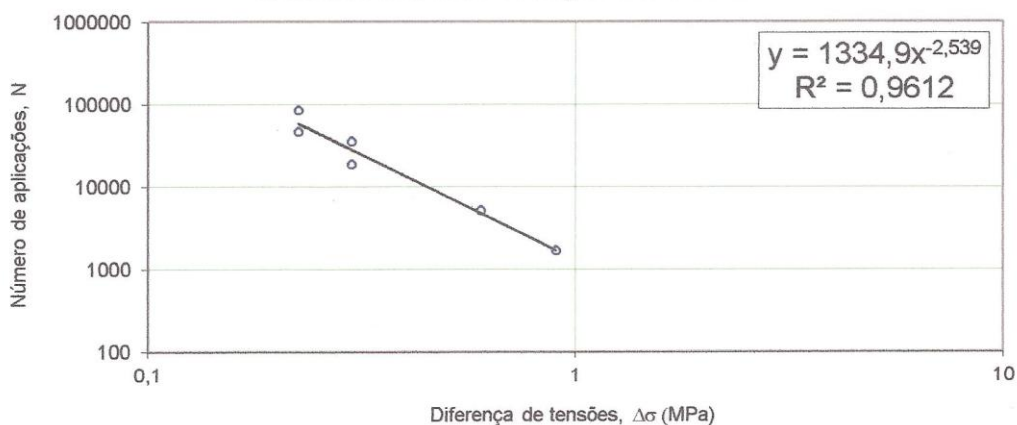
Equação do cil. de carga (125mm):

$$P_{m(0-10)} = 0,0088 F + 0,0822$$

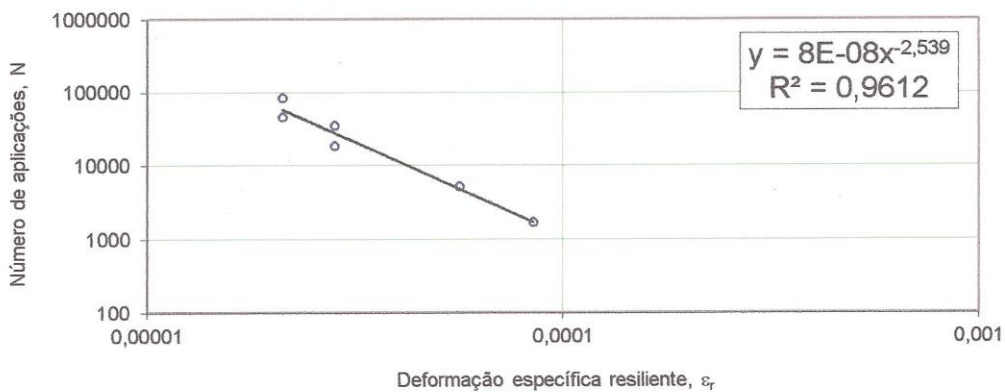
$$F_{(0-10)} = 114,07 P_m + 9,2705$$

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm ²)	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
18081	5,86	10,19	7,5	53,8	0,56	0,0000212	0,22	85105
18082	5,85	10,19	7,5	53,7	0,55	0,0000212	0,22	46347
18083	5,88	10,17	10	71,9	0,71	0,0000282	0,30	18818
18084	5,87	10,19	10	71,9	0,71	0,0000282	0,30	35564
18085	5,93	10,15	20	144,7	1,36	0,0000564	0,60	5245
18087	5,89	10,16	30	215,7	1,98	0,0000847	0,90	1724

VIDA DE FADIGA x DIFERENÇA DE TENSÕES



VIDA DE FADIGA x DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA RESILIENTE



ANEXO 11

ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL
MISTURA ASFÁLTICA: TRAÇO MATERIAL RECICLADO

ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: UFAM - Mist 6 Fresado

Protocolo: 31-12

Temperatura de ensaio: 25 °C

Operador(es): ROBERTO VIANNA

Módulo resiliente médio da amostra:

8320 MPa

Interessado: Eduardo

Resistência máxima à tração estática, σ_{Tmax} :

1,39 MPa

Data: junho/2012

**PAINEL
PM-1**

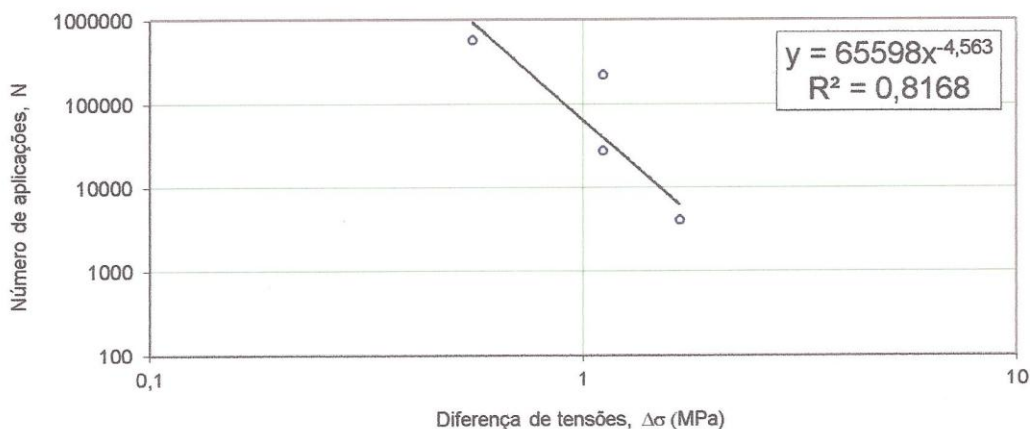
Equação do cil. de carga (125mm):

$$P_{m(0-10)} = 0,0088 F + 0,0822$$

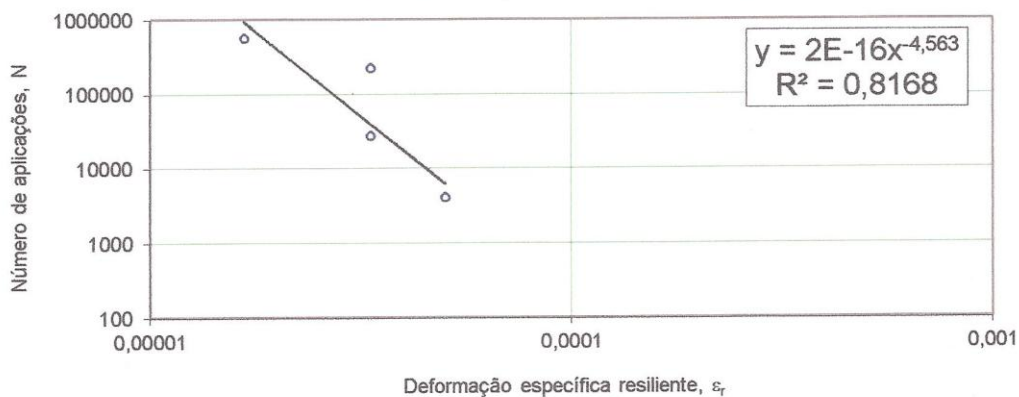
$$F_{(0-10)} = 114,07 P_m + 9,2705$$

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm ²)	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
18095	5,82	10,15	10	131,6	1,24	0,0000167	0,56	578228
18097	5,84	10,16	20	264,3	2,41	0,0000334	1,11	27805
18098	5,82	10,16	20	263,4	2,40	0,0000334	1,11	228811
18099	5,81	10,19	30	395,6	3,56	0,0000501	1,67	4161
18100	5,81	10,16	30	394,4	3,55	0,0000501	1,67	4115

VIDA DE FADIGA x DIFERENÇA DE TENSÕES



VIDA DE FADIGA x DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA RESILIENTE



ANEXO 12

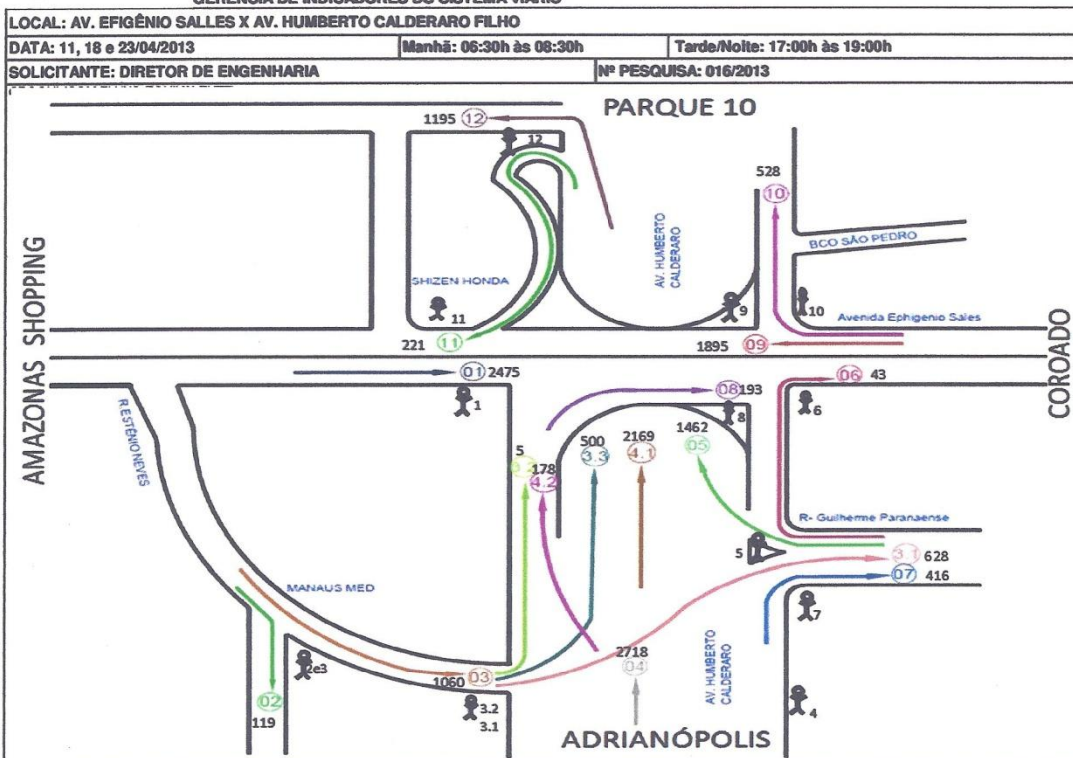
PESQUISA 2013\VEÍCULOS\TABULAÇÃO DE PESQUISA\016

TABULAÇÃO - AV. EFIGÊNIO SALES X AV. HUMBERTO CALDERARO

FILHO



PREFEITURA DE MANAUS
INSTITUTO MUNICIPAL DE ENGENHARIA E FISCALIZAÇÃO DO TRÂNSITO - MANAUSTRANS
DIRETORIA DE ENGENHARIA E EDUCAÇÃO PARA O TRÂNSITO
DIVISÃO DE ESTATÍSTICA E GESTÃO DE INFORMAÇÃO
GERÊNCIA DE INDICADORES DO SISTEMA VIÁRIO



Fluxo equivalente a hora pico de cada movimento - Manhã

MOVIMENTO	HORA PICO	AUTO	MOTO	ÔNIBUS COMUM	ÔNIBUS ARTICULADO	CAMINHÃO	CARRETA	EQUIVALENTE
1	07:30 - 08:30	1986	338	37	7	75	17	2475
2	07:15 - 08:15	114	9	0	0	0	0	119
3	06:30 - 07:30	1015	61	2	0	5	0	1060
3.1	06:30 - 07:30	617	13	2	0	0	0	628
3.2	07:15 - 08:15	5	0	0	0	0	0	5
3.3	07:15 - 08:15	435	74	3	0	11	0	500
4	07:00 - 08:00	2298	267	95	4	38	1	2718
4.1	07:15 - 08:15	1769	232	96	5	32	1	2169
4.2	07:00 - 08:00	155	17	1	0	6	0	178
5	06:45 - 07:45	1394	44	13	0	10	0	1462
6	07:30 - 08:30	37	7	0	0	1	0	43
7	06:30 - 07:30	402	15	3	0	0	0	416
8	07:00 - 08:00	170	17	1	0	6	0	193
9	06:30 - 07:30	1412	541	47	12	21	7	1895
10	07:15 - 08:15	442	123	12	0	0	0	528
11	06:30 - 07:30	207	8	3	0	2	0	221
12	07:00 - 08:00	1129	64	12	0	5	0	1195

OBSERVAÇÕES

TEMPO:

(x) SOL OU NUBLADO
() CHUVA FRACA
() CHUVA FORTE

Número de pesquisadores - 05

Responsáveis

MINUZA LIRA

Divisão de Estatística e Gestão de Informação

HANARA CARVALHO

Gerente de Indicadores do Sistema Viário

KEIKO AIKAWA

Supervisora de pesquisa

RAMUNDO NOGUEIRA

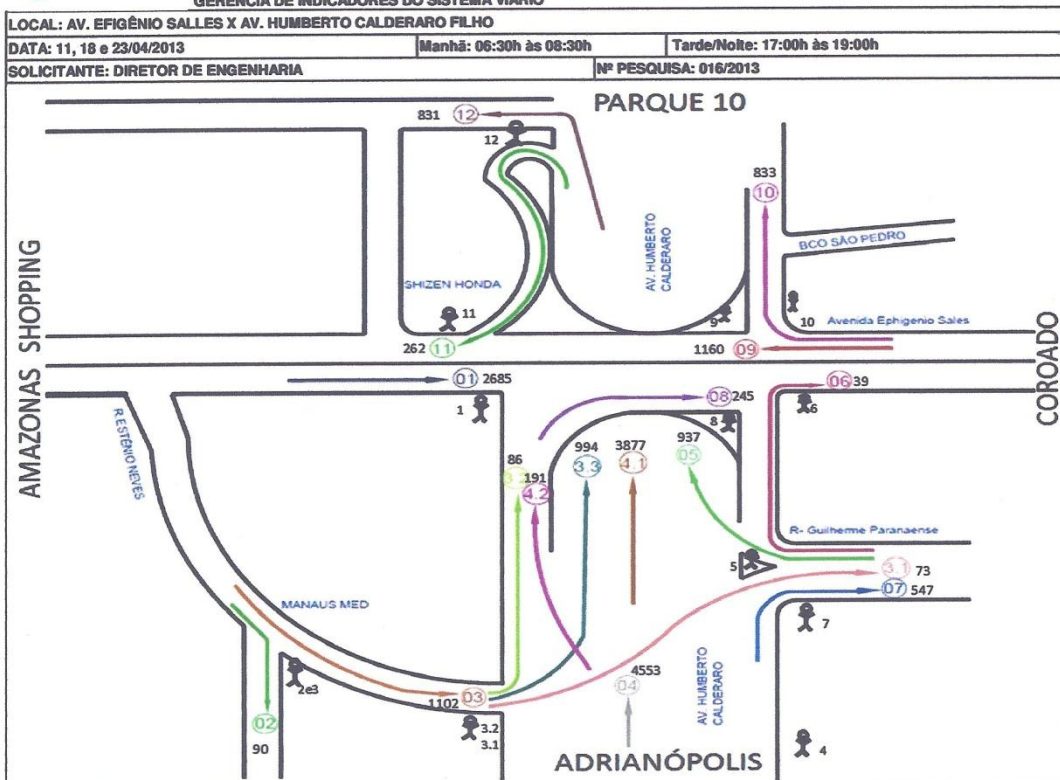
Supervisor de pesquisa

Visto:

1



PREFEITURA DE MANAUS
INSTITUTO MUNICIPAL DE ENGENHARIA E FISCALIZAÇÃO DO TRÂNSITO - MANAUSTRANS
DIRETORIA DE ENGENHARIA E EDUCAÇÃO PARA O TRÂNSITO
DIVISÃO DE ESTATÍSTICA E GESTÃO DE INFORMAÇÃO
GERÊNCIA DE INDICADORES DO SISTEMA VIÁRIO



Fluxo equivalente a hora pico de cada movimento - Tarde

MOVIMENTO	HORA PICO	AUTO	MOTO	ÔNIBUS COMUM	ÔNIBUS ARTICULADO	CAMINHÃO	GARRETA	EQUIVALENTE
1	17:30 - 18:30	2135	488	49	9	46	20	2685
2	17:15 - 18:15	88	4	0	0	0	0	90
3	17:45 - 18:45	1043	81	5	0	4	0	1102
3.1	17:00 - 18:00	69	3	1	0	0	0	73
3.2	17:00 - 18:00	71	6	3	0	3	0	86
3.3	17:45 - 18:45	951	77	1	0	1	0	994
4	17:45 - 18:45	4053	416	100	1	40	2	4553
4.1	17:45 - 18:45	3426	357	93	1	37	2	3877
4.2	18:00 - 19:00	165	20	5	0	3	0	191
5	17:15 - 18:15	870	45	14	0	8	0	937
6	18:00 - 19:00	34	2	1	0	1	0	39
7	17:30 - 18:30	519	40	3	0	1	0	547
8	18:00 - 19:00	214	22	6	0	4	0	245
9	17:00 - 18:00	884	304	27	8	15	2	1160
10	18:00 - 19:00	638	105	32	0	17	11	833
11	17:00 - 18:00	237	18	7	0	1	0	262
12	17:00 - 18:00	764	69	10	0	6	0	831

OBSERVAÇÕES

TEMPO:
(x) SOL OU NUBLADO
() CHUVA FRACA
() CHUVA FORTE

Número de pesquisadores - 05

Responsáveis

MINUZA LIRA
Divisão de Estatística e Gestão de Informação

HANARA CARVALHO
Gerente de Indicadores do Sistema Viário

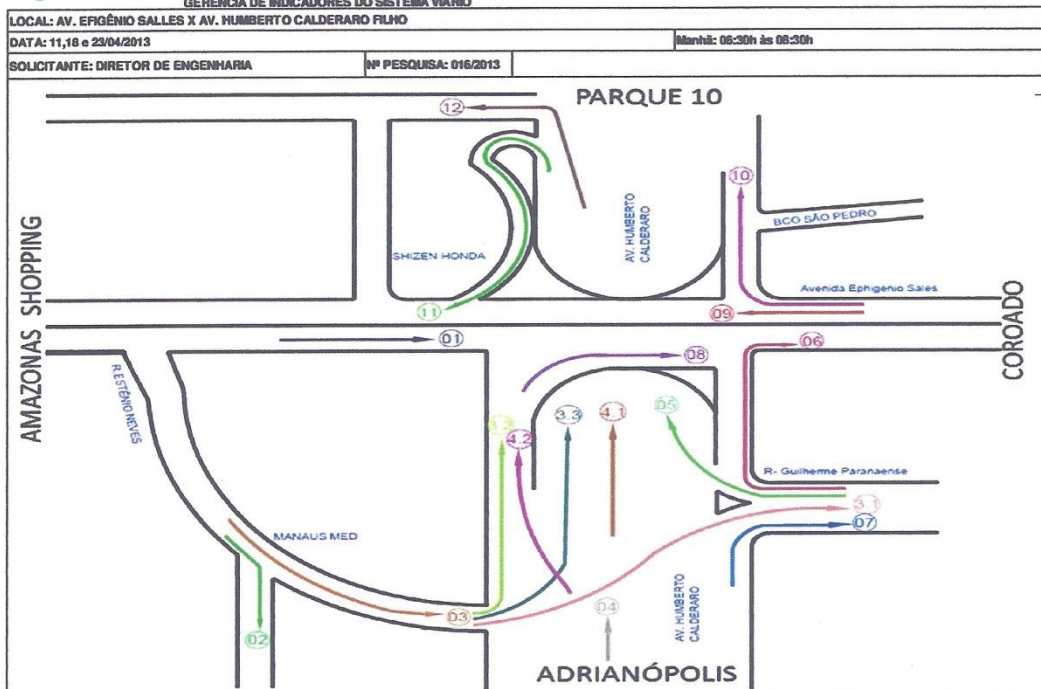
KEIKO AKAWA
Supervisora de pesquisa

RAMUNDO NOGUEIRA
Supervisor de pesquisa

Visto:



PREFEITURA DE MANAUS
INSTITUTO MUNICIPAL DE ENGENHARIA E FISCALIZAÇÃO DO TRÂNSITO - MANAUSTRANS
DIRETORIA DE ENGENHARIA E EDUCAÇÃO PARA O TRÂNSITO
DIVISÃO DE ESTATÍSTICA E GESTÃO DE INFORMAÇÃO
GERÊNCIA DE INDICADORES DO SISTEMA VIÁRIO



Manhã																		TOTAL
HORA PICO	MOV1	MOV2	MOV3	MOV	MOV 3.2	MOV	MOV4	MOV 4.1	MOV 4.2	MOV5	MOV6	MOV7	MOV8	MOV9	MOV1	MOV1	MOV1	
06:30 - 07:30	2320	85	1060	628	4	432	2531	1936	134	1327	30	416	144	1895	397	221	1039	14899
06:45 - 07:45	2301	100	1028	565	4	459	2693	2094	163	1462	38	347	176	1836	439	196	1185	15086
07:00 - 08:00	2390	112	1005	522	4	480	2718	2156	178	1450	37	283	193	1728	503	188	1195	15142
07:15 - 08:15	2444	119	980	475	5	500	2671	2169	177	1327	38	236	191	1815	528	206	1105	14886
07:30 - 08:30	2475	119	907	437	4	470	2574	2098	175	1160	43	226	184	1856	528	197	971	14424

Tarde																		TOTAL
HORA PICO	MOV1	MOV2	MOV3	MOV	MOV 3.2	MOV	MOV	MOV 4.1	MOV 4.2	MOV5	MOV6	MOV7	MOV8	MOV9	MOV1	MOV1	MOV1	
17:00 - 18:00	2419	86	1042	73	86	861	4245	3612	127	935	31	506	236	1160	652	262	831	17164
17:15 - 18:15	2524	90	1067	54	78	922	4515	3836	141	937	25	539	231	887	587	225	785	17443
17:30 - 18:30	2685	90	1083	35	73	964	4517	3825	145	914	14	547	228	662	561	192	772	17307
17:45 - 18:45	2666	76	1102	30	73	994	4533	3877	162	860	27	515	239	852	616	185	768	17585
18:00 - 19:00	2580	80	1029	19	55	955	4527	3866	191	863	39	471	245	1110	833	180	736	17779

Responsáveis: MINUZA LIRA
Divisão de Estatística e Gestão de Informação

HANARA CARVALHO
Gerente de Indicadores do Sistema Viário

KEKO AKAWA
Supervisora de pesquisa

RAMUNDO NOGUEIRA
Supervisor de pesquisa

Visto: