

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE MISTURAS
SOLO-EMULSÃO APLICADO ÀS RODOVIAS DO
AGROPÓLO DO BAIXO JAGUARIBE/ESTADO DO CEARÁ**

Lilian Medeiros Gondim

**Dissertação submetida ao Programa de
Mestrado em Engenharia de Transportes
da Universidade Federal do Ceará, como
parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em
Engenharia de Transportes**

ORIENTADOR(A): Prof.^a Dra Suelly Helena de Araújo Barroso

**Fortaleza
2008**

FICHA CATALOGRÁFICA

G635s GONDIM, LILIAN MEDEIROS

Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe / Estado do Ceará / Lilian Medeiros Gondim, xxxv, 213 fl., il., color., enc.

Orientador: Profª Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, 2008.

- | | |
|--------------------------------|----------------------|
| 1. Agropólo do Baixo Jaguaribe | 2. Emulsão asfáltica |
| 3. Estabilização Betuminosa | 4. Solo-Emulsão |

CDD 388

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GONDIM, L. M. (2008) Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 213 fl.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lilian Medeiros Gondim

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará.

Mestre / 2008

É concedida à Universidade Federal do Ceará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Lilian Medeiros Gondim

Rua Tomás Acioly 320 apto 803 B1 I

60135-180 – Fortaleza/CE – Brasil

ESTUDO EXPERIMENTAL DE MISTURAS SOLO-EMULSÃO APLICADO ÀS
RODOVIAS DO AGROPÓLO DO BAIXO JAGUARIBE/ESTADO DO CEARÁ

Lilian Medeiros Gondim

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE
TRANSPORTES.

Aprovada por:

Profª. Suelly Helena de Araújo Barroso, D.Eng.
(Orientadora)

Prof. Jorge Barbosa Soares, PhD
(Examinador Interno)

Prof. Glauco Túlio Pessa Fabbri, D. Eng.
(Examinador Externo)

FORTALEZA, CE – BRASIL

OUTUBRO DE 2008

*“O estudo, a busca da verdade e da beleza
são domínios em que nos é consentido
sermos crianças por toda a vida”.*

Albert Einstein

DEDICATÓRIA

Ao meu noivo Boris, merecedor de todo meu amor e dedicação.

Aos meus pais, Lina e Fabio, que me ensinaram o caminho da disciplina, da dignidade e da felicidade.

Aos meus irmãos, Delano e Lorena, pelo carinho, torcida e companheirismo.

Ao meu sobrinho Victor, que é a alegria da minha família.

À minha madrinha, Maria dos Remédios, a quem tanto estimo e admiro.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sua imensa fidelidade e por todas as vezes que ele moveu no sobrenatural para que esta pesquisa fosse realizada.

Ao meu noivo Helmer Boris, por toda a sua dedicação, sem a qual esse trabalho não teria chegado ao fim.

À Professora Suelly Helena de Araújo Barroso, por ter sido muito mais que uma orientadora, sendo antes uma grande amiga e um referencial.

À grande amiga Lucimar da Silva Santiago Dotd, com quem dividi todos os choros e sorrisos nos últimos anos (e pretendo continuar dividindo!)

À minha segunda família, Joaquim, Valdira, Bruno, Breno, Bráulio, Gabriela, Ana Carolina e Artur, pelo incentivo incondicional.

Às amigas Ivone Aleixo, Michéle Dal Toé Casagrande e Annie Karine, por todo apoio, conselhos e suporte concedido.

Aos Professores do Departamento de Engenharia de Transportes, em especial ao Professor Jorge Barbosa Soares pelos conhecimentos transmitidos.

À Asfaltos Nordeste, pela cessão das emulsões asfálticas e por toda a atenção concedida.

A todo o grupo de Solos do LMP, em especial aos amigos José Marcondes Caldas, Nobre Rabêlo, Edvaldo, Bruno Tiago Silva e Gerlânia Baraúna, pelo incentivo incondicional.

Ao Professor Franklin Chaves e ao Engenheiro Paulo Loiola, pelas grandes contribuições técnicas dadas a este trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação, Carlos Germano, Ana e Roberto, por todas as dicas e o auxílio na realização dos ensaios.

Ao Professor Sasaki e Eulivana do Laboratório de Raios X, pela realização dos ensaios de difratometria e fluorescência de Raios X.

Ao Lincoln e ao Gustavo do GPEC - Grupo de Processamento de Energia e Controle, pelo auxílio na manutenção dos equipamentos necessários à realização desta pesquisa.

Aos amigos Marília Bechara e Adalberto Faxina pelo grande apoio durante minha estada em São Carlos.

Ao Grupo de Modelagem do LMP, em especial aos amigos Henrique Nogueira e Pedro Souza, por todo o apoio computacional concedido.

Ao CNPq, pela concessão da minha bolsa de mestrado.

Aos meus verdadeiros amigos, de quem furtei preciosos momentos durante a realização deste trabalho.

RESUMO

Diante da retomada do crescimento do agronegócio do Agropólo do Baixo Jaguaribe, a melhoria da malha viária da região tornou-se imprescindível. No entanto, o baixo volume de tráfego registrado nas rodovias locais, a baixa qualidade dos materiais ocorrentes na região e os poucos recursos disponíveis para investimentos em infra-estrutura, inviabilizam economicamente os empreendimentos rodoviários. Tornou-se então necessária a busca por soluções alternativas que reduzam os custos de implementação e melhoria de pavimentos. Acredita-se que a adição de emulsão asfáltica aos solos ocorrentes na região, devido às suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, pode constituir-se em uma dessas alternativas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade técnica da estabilização betuminosa de solos ocorrentes no Agropólo do Baixo Jaguaribe, no Estado do Ceará, para o emprego em camadas de base de rodovias. Para tanto, foram selecionados três solos da região para o estudo da estabilização com a adição da emulsão asfáltica de ruptura lenta (RL-1C). As variáveis investigadas foram o teor de emulsão aplicado (2%, 5% e 8%), o tempo de cura seca ao ar livre (sem cura, 7 dias e 28 dias de cura), e a forma de distribuição da emulsão (distribuição uniforme ou em gradiente decrescente com a profundidade). As misturas solo-emulsão foram submetidas à avaliação da resistência mecânica (por meio dos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, Índice de Suporte Califórnia e módulo de resiliência) e à avaliação da resistência ao desgaste e à abrasão (por meio dos ensaios adaptados Loaded Wheel Test – LWT e Wet Track Abrasion Test – WTAT). Foi observado que a estabilização betuminosa promoveu incrementos de resistência das amostras de solos estudadas, sendo essa resistência dependente da umidade residual dos corpos de prova no momento da realização do ensaio. Os resultados indicaram também que a adição de emulsão asfáltica tem efeitos distintos para os vários tipos de solos, sendo que a quantidade de sílica presente nas amostras parece influenciar a qualidade das misturas solo-emulsão. Conclui-se, à luz dos ensaios realizados, que algumas amostras de solos ocorrentes na Região do Baixo Jaguaribe podem ser satisfatoriamente estabilizadas com emulsão asfáltica.

ABSTRACT

Taking into account that the agribusiness of Baixo Jaguaribe's Agricultural Pole is developing again, it is essential to improve the road network of the area. However, the low traffic volume observed in the local highways, the low quality of the materials in the area and the limited available resources to invest on infrastructure make the road constructions economically unfeasible. Therefore, it became necessary to search for alternative solutions that reduce the implementation costs and improve pavements. It is considered that the addition of asphalt emulsion to the soils in the area can be one of those alternatives, due to its agglutinative and waterproof properties. The objective of this work was to evaluate the technical viability of the bituminous stabilization of soils occurring in the Agricultural Pole of Baixo Jaguaribe, in the State of Ceará, to be used in base layers of highways. For that purpose, it was selected three soils on the area to the study of the stabilization with the addition of a cationic slow setting asphalt emulsion. The variables investigated were the rate of emulsion applied (2%, 5% and 8%), the open air dry curing time (without cure, 7 days and 28 days), and the emulsion distribution (uniform distribution or in decreasing gradient with depth). The soil-emulsion mixtures were evaluated regarding their mechanical resistance (through the compression strength test, diametrical compression test, California Bearing Ratio and the resilience modulus test) and their resistance to wearing and abrasion (through the adapted tests Loaded Wheel Test - LWT and Wet Track Abrasion Test - WTAT). It was observed that the bituminous stabilization produced an increase in the resistance of the soil samples studied, that resistance being dependent on the residual humidity of the test specimens in the moment of test conduction. The results also indicated that the addition of asphalt emulsion has different effects for the several types of soils, so that the amount of silica present in the samples seems to influence the quality of the soil-emulsion mixtures. According to the tests carried out, it was concluded that some samples of soils present in the area of Baixo Jaguaribe can be satisfactorily stabilized with asphalt emulsion.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2	OBJETIVOS.....	7
1.3	METODOLOGIA	8
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	8
CAPÍTULO 2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	10
2.2	EMULSÕES ASFÁLTICAS	10
2.2.1	Definição.....	12
2.2.2	Fabricação das Emulsões Asfálticas	13
2.2.3	Propriedades das Emulsões Asfálticas.....	15
2.2.3.1	Carga da Partícula.....	15
2.2.3.2	Ruptura.....	17
2.2.4	Classificação, Especificações e Aplicabilidade das Emulsões Asfálticas ..	20
2.3	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	23
2.3.1	Definição.....	24
2.3.2	Estabilização Mecânica.....	25
2.3.2.1	Compactação.....	25
2.3.2.2	Estabilização granulométrica	26

2.3.3	Estabilização Química	26
2.3.3.1	Solo-Cimento	27
2.3.3.2	Solo-Cal	28
2.4	ESTABILIZAÇÃO BETUMINOSA.....	29
2.4.1	Desenvolvimento Histórico da Estabilização Betuminosa	29
2.4.2	Mecanismos da Estabilização Betuminosa	35
2.4.3	Variáveis que Influenciam a Estabilização Betuminosa.....	40
2.4.3.1	Tipo de Solo.....	40
2.4.3.2	Tipo de Emulsão	43
2.4.3.3	Teor Ótimo.....	45
2.4.3.4	Tempo de Aeração	46
2.4.3.5	Processo de Cura.....	48
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
CAPÍTULO 3	MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	50
3.2	ESCOLHA DOS MATERIAIS.....	52
3.2.1	Solos.....	52
3.2.1.1	Amostra A.....	56
3.2.1.2	Amostra B	57
3.2.1.3	Amostra C	58
3.2.2	Emulsão Asfáltica	59

3.3 O PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	59
3.3.1 Considerações Gerais.....	59
3.3.2 Caracterização dos Solos	61
3.3.2.1 Caracterização Geotécnica.....	61
3.3.2.2 Classificação MCT	62
3.3.2.3 Caracterização Química.....	62
3.3.2.4 Fluorescência de Raios X	62
3.3.2.5 Difractometria de Raios X.....	63
3.3.3 Caracterização da Emulsão.....	63
3.3.4 Processo de Mistura Solo-Emulsão	64
3.3.5 Estudo de Resistência Mecânica.....	69
3.3.5.1 Compactação.....	69
3.3.5.2 Resistência à Compressão Simples.....	69
3.3.5.3 Índice de Suporte Califórnia.....	70
3.3.5.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral	71
3.3.5.5 Módulo de Resiliência	71
3.3.5.5.1. O Conceito do Ensaio Triaxial de Carga Repetida.....	71
3.3.5.5.2. Aparentagem e Procedimentos do Ensaio Triaxial de Carga Repetida	73
3.3.6 Resistência ao Desgaste.....	76
3.3.6.1 Loaded Wheel Test (LWT).....	77

3.3.6.2	Wet Track Abrasion Test (WTAT).....	81
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
CAPÍTULO 4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	86
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	86
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS	86
4.2.1	Caracterização Geotécnica.....	87
4.2.1.1	Densidade Real	87
4.2.1.2	Granulometria	88
4.2.1.3	Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade	90
4.2.1.4	Classificação TRB	91
4.2.1.5	Classificação MCT	91
4.2.2	Caracterização Química.....	92
4.2.2.1	Potencial Hidrogeniônico (pH).....	93
4.2.2.2	Capacidade de Troca Catiônica (CTC).....	95
4.2.2.3	Relação Sílica-Alumina e Sílica-Sesquióxidos.....	97
4.2.3	Análise Mineralógica.....	98
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA EMULSÃO ASFÁLTICA.....	101
4.4	ANÁLISE MECÂNICA	101
4.4.1	Ensaio de Compactação	101
4.4.1.1	Solo A	102
4.4.1.2	Solo B	104

4.4.1.3	Solo C	104
4.4.1.4	Efeitos da Estabilização Betuminosa na Compactação dos Solos Estudados	106
4.4.2	Resistência à Compressão Simples	108
4.4.2.1	Resistência à compressão simples dos solos puros.....	109
4.4.2.2	Solo A	111
4.4.2.3	Solo B	113
4.4.2.4	Solo C	115
4.4.2.5	Efeitos da Estabilização Betuminosa na RCS de Solos Estudados	117
4.4.3	Resistência à Tração por Compressão Diametral	125
4.4.3.1	Misturas com o Solo A	126
4.4.3.2	Misturas com o Solo B.....	128
4.4.3.3	Misturas com o Solo C.....	130
4.4.3.4	Comparação dos Valores de RTI Encontrados para as Misturas Solo-Emulsão e Outras Pesquisas	131
4.4.4	Índice de Suporte Califórnia	133
4.4.4.1	Solo A	133
4.4.4.2	Solo B	135
4.4.4.3	Solo C	136
4.4.4.4	Efeitos da Estabilização Betuminosa sobre o Índice de Suporte Califórnia dos Solos Estudados.....	137
4.4.5	Módulo de Resiliência	138

4.4.5.1	Escolha do Modelo Resiliente	139
4.4.5.2	Solo A	143
4.4.5.3	Solo B	150
4.4.5.4	Solo C	155
4.4.5.5	Efeitos da Estabilização Betuminosa Sobre o MR dos Solos Estudados	160
4.4.6	Determinação do Teor Ótimo de Emulsão para Cada Amostra de Solo ..	161
4.4.7	Avaliação Mecânica da Distribuição em Gradiente da Emulsão Asfáltica	162
4.4.7.1	Resistência à Compressão Simples.....	163
4.4.7.2	Módulo de Resiliência	166
4.4.7.3	Efeitos da Distribuição da Emulsão em Gradiente Sobre o Comportamento Mecânico das Misturas Solo-Emulsão.....	169
4.5	AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO E AO DESGASTE	169
4.5.1	LWT.....	170
4.5.1.1	Solo A	171
4.5.1.2	Solo B	174
4.5.1.3	Solo C	176
4.5.2	WTAT.....	177
4.5.2.1	Solo A	178
4.5.2.2	Solo B	179
4.5.2.3	Solo C	180

4.5.3	Efeitos da Estabilização Betuminosa sobre a Resistência ao Desgaste das Amostras Estudadas	182
4.6	DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS HIPOTÉTICOS	184
4.6.1	Estrutura 1	186
4.6.2	Estrutura 2	188
4.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	189
CAPÍTULO 5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	191
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	191
5.2	PRINCIPAIS CONCLUSÕES.....	192
5.2.1	Quanto à Caracterização Geotécnica, Química e Mineralógica dos Solos	192
5.2.2	Quanto aos Resultados dos Ensaios de Compactação	193
5.2.3	Quanto aos Resultados dos Ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS)	194
5.2.4	Quanto aos Resultados dos Ensaios de Resistência à Tração Indireta (RTI)	195
5.2.5	Quanto aos Resultados dos Ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC)	196
5.2.6	Quanto aos Resultados dos Ensaios de Módulo de Resiliência (MR).....	196
5.2.7	Quanto aos Resultados dos Ensaios de LWT Adaptados	197
5.2.8	Quanto aos Resultados dos Ensaios de WTAT Adaptados	197
5.2.9	Quanto à Distribuição da Emulsão em Gradiente.....	198
5.2.10	Quanto ao Dimensionamento de um Pavimento com o Emprego de Solo-Emulsão	198

5.3 RECOMENDAÇÕES.....	199
5.4 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	200
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	202
ANEXO 1 – ALGORITMO PARA A CONFECÇÃO DOS GRÁFICOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA	213

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa dos Agropólos do Ceará à data da concepção do Projeto Agropólos. (SEAGRI, 2001 <i>apud</i> Santiago, 2005)	2
Figura 1.2 - Resquícios do emprego da técnica solo-betume no estado do Ceará (Arquivo pessoal do Prof. Franklin José Chaves).....	6
Figura 2.1 - Aplicação de emulsão asfáltica no início do século XX (Omena e Antoszczem Junior, 2006).	11
Figura 2.2 - Fenômenos envolvidos na mistura de duas substâncias imiscíveis (Bernucci <i>et al.</i> , 2007).	12
Figura 2.3 - Gota de emulsão asfáltica ampliada 1000 vezes (Omena e Antoszczem Junior, 2006).	13
Figura 2.4 - Esquema de Produção de Emulsão Asfáltica (ABEDA, 2001).	14
Figura 2.5 - Instalação de uma fábrica de emulsão asfáltica.	15
Figura 2.6 - Comportamento do emulsificante na emulsão (Soares, 2006).....	16
Figura 2.7 - Emulsão Aniônica (Soares, 2006).....	16
Figura 2.8 - Emulsão Catiônica (Soares, 2006)	16
Figura 2.9 - Coalescência na interface emulsão/agregado (Soares, 2006)	18
Figura 2.10 - Tipos de composições granulométricas (Yoder e Witczak, 1975).....	26
Figura 2.11 - Esquema para a aplicação do primeiro terço de emulsão, na distribuição em gradiente (Santana, 1976).	32
Figura 2.12 - Esquema para a aplicação do segundo terço de emulsão, na distribuição em gradiente (Santana, 1976).	33

Figura 2.13 - Esquema para a aplicação da terceira parte da emulsão, na distribuição em gradiente e aspecto final da camada (Santana, 1976).	33
Figura 2.14 - Filme betuminoso encobrendo as partículas de solo. 1- partícula de solo, 2- vazios, 3-água, 4-filme betuminoso, a-contato entre grãos (Kézdi, 1979 <i>apud</i> Miceli Jr, 2006).	36
Figura 2.15 - Forças de adesão atuantes entre as fases do sistema solo-água-emulsão (Kézdi, 1979 <i>apud</i> Miceli Jr, 2006)	39
Figura 2.16 - Esquema das reações entre os agregados graníticos e as emulsões asfálticas catiônicas e aniônicas (Nascimento, 2005).	44
Figura 2.17 - Esquema das reações entre os agregados calcáreos e as emulsões asfálticas catiônicas e aniônicas (Nascimento, 2005).	44
Figura 2.18 - Resistência à compressão simples em função do tempo de aeração (Carvalho <i>et al.</i> , 1992)	47
Figura 3.1 - Localização geográfica e divisão municipal do agropólo Baixo Jaguaribe (mapa fornecido pela SEAGRI, 2006).	50
Figura 3.2 - Modelo Digital do Terreno do Agropólo do Baixo Jaguaribe obtido a partir do Modelo Digital do Terreno do Estado do Ceará (IPECE, 2007).	53
Figura 3.3 - Mapa Climático do Agropólo do Baixo Jaguaribe obtido a partir do Mapa Climático do Estado do Ceará (IPECE, 2007).	54
Figura 3.4 - Mapa pedológico do agropólo Baixo Jaguaribe (Rabêlo, 2006).	55
Figura 3.5 - Localização da jazida A.	56
Figura 3.6 - Aspecto da jazida A.	56
Figura 3.7 - Localização da jazida B.	57
Figura 3.8 - Aspecto da jazida B.	57
Figura 3.9 - Localização da jazida C.	58

Figura 3.10 - Aspecto da jazida C.....	58
Figura 3.11 - Esquema geral dos corpos de prova produzidos.	60
Figura 3.12 - Aspecto da distribuição da emulsão em gradiente em um corpo de prova.	61
Figura 3.13 - Equipamento Rigaku (ZSX Mini II) pertencente ao Laboratório de Raios X da UFC.	63
Figura 3.14 - Equipamento Rigaku (DMAXB) pertencente ao Laboratório de Raios X da UFC.....	63
Figura 3.15 - Processo de mistura solo-emulsão.	66
Figura 3.16 - Processo de mistura para distribuição em gradiente e aspecto das diferentes camadas.....	68
Figura 3.17 - Ensaio de resistência à compressão simples.	70
Figura 3.18 - Representação das deformações sofridas pela amostra submetida ao ensaio triaxial de carga repetida (adaptado de Bernucci <i>et al.</i> , 2007).	72
Figura 3.19 - Prensa triaxial de carga repetida do LMP/UFC.	73
Figura 3.20 - Esquema de um equipamento triaxial de carga repetida (Medina e Motta, 2005).	74
Figura 3.21 - Condição de carregamento de um corpo de prova durante o ensaio de módulo de resiliência (Souza Júnior, 2005).....	75
Figura 3.22 - Modelo esquemático de registro dos deslocamentos verticais dos ensaios triaxiais de carga repetida (Medina e Motta, 2005).	75
Figura 3.23 - Equipamento de LWT do LMP, durante execução do ensaio.....	77
Figura 3.24 - Processo de moldagem do corpo de prova para o ensaio LWT adaptado.	79
Figura 3.25 - Execução do ensaio LWT adaptado.....	80

Figura 3.26 - Equipamento WTAT do LMP, em fase de teste.	81
Figura 3.27 - Detalhe da fôrma utilizada para o ensaio de WTAT.....	82
Figura 3.28 - Processo de moldagem e realização do ensaio WTAT adaptado.....	84
Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos solos estudados.....	88
Figura 4.2 - Localização das amostras no ábaco de classificação MCT.....	92
Figura 4.3 - Difratoograma do solo A.....	98
Figura 4.4 - Difratoograma do solo B.....	99
Figura 4.5 - Difratoograma do solo C.....	100
Figura 4.6 - Corpos de prova resultantes do ensaio de compactação da mistura solo B + 5% de emulsão.	102
Figura 4.7 - Curvas de compactação do Solo A e suas misturas com emulsão.....	103
Figura 4.8 - Curvas de compactação do solo B e suas misturas com emulsão.....	104
Figura 4.9 - Curvas de compactação solo C e suas misturas com emulsão.....	105
Figura 4.10 - Relação entre teor de emulsão e densidade máxima das misturas.....	106
Figura 4.11 - Relação entre teor de emulsão e umidade ótima das misturas.....	106
Figura 4.12 - Padrão de ruptura das amostras submetidas aos ensaios de resistência à compressão simples.	108
Figura 4.13 - Resultados dos ensaios de RCS para os solos puros.....	110
Figura 4.14 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para o solo A estabilizado.	112
Figura 4.15 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para solo B estabilizado.	114

Figura 4.16 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para solo C estabilizado.	116
Figura 4.17 - Variação da RCS em função da umidade residual para o solo A.	119
Figura 4.18 - Linhas de tendência das relações RCS × Umidade residual para o solo A.	119
Figura 4.19 - Variação da resistência à compressão simples em função da umidade residual para o solo B.....	120
Figura 4.20 - Linhas de tendência das relações RCS × Umidade residual para o solo B.	120
Figura 4.21 - Variação da resistência à compressão simples em função da umidade residual do solo C.	121
Figura 4.22 - Linhas de tendência das relações RCS × Umidade residual para o solo C.	121
Figura 4.23 - Linhas de tendência das relações RCS × Umidade residual para o solo A-Miceli.	123
Figura 4.24 - Linhas de tendência das relações RCS × Umidade residual para o solo B-Miceli.	123
Figura 4.25 - Padrão de ruptura das misturas solo-emulsão submetidas aos ensaios de RTI.	126
Figura 4.26 - Resultados dos ensaios de RTI para as misturas do solo A com emulsão asfáltica.	127
Figura 4.27 - Resultados dos ensaios de RTI para as misturas do solo B com emulsão asfáltica.	129
Figura 4.28 - Resultados dos ensaios de RTI para as misturas do solo C com emulsão asfáltica.	130

Figura 4.29 - Resultados dos ensaios de ISC do solo A e suas misturas com emulsão asfáltica.	134
Figura 4.30 - Resultados dos ensaios de ISC do solo B e suas misturas com emulsão asfáltica.	135
Figura 4.31 - Resultados dos ensaios de ISC do solo C e suas misturas com emulsão asfáltica.	136
Figura 4.32 - Modelo composto para o módulo resiliente do solo A.	143
Figura 4.33 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo A puro.....	144
Figura 4.34 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo A + 2% de emulsão.	145
Figura 4.35 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo A + 5% de emulsão.	145
Figura 4.36 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo A + 8% de emulsão.	146
Figura 4.37 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo A com emulsão asfáltica ensaiadas imediatamente após a moldagem.	147
Figura 4.38 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo A com emulsão asfáltica ensaiadas após 7 dias de cura.	147
Figura 4.39 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo A com emulsão asfáltica ensaiadas após 28 dias de cura.	148
Figura 4.40 - Modelo composto para o módulo resiliente do solo B.....	150
Figura 4.41 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo B puro.....	151

Figura 4.42 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo B + 2% de emulsão.	151
Figura 4.43 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo B + 5% de emulsão.	152
Figura 4.44 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo B + 8% de emulsão.	152
Figura 4.45 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo B com emulsão asfáltica ensaiadas imediatamente após a moldagem.	153
Figura 4.46 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo B com emulsão asfáltica ensaiadas após cura de 7 dias.	154
Figura 4.47 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo B com emulsão asfáltica ensaiadas após cura de 28 dias.	154
Figura 4.48 - Aspecto do corpo de prova do solo C puro ensaiado imediatamente após a moldagem.....	155
Figura 4.49 - Gráficos do MR do solo C puro após cura de 7 dias.....	156
Figura 4.50 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo C + 2% de emulsão.	156
Figura 4.51 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo C + 5% de emulsão.	157
Figura 4.52 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo C + 8% de emulsão.	157
Figura 4.53 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo C com emulsão asfáltica ensaiados imediatamente após a moldagem.	158
Figura 4.54 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo C com emulsão asfáltica ensaiados após 7 dias de cura.	159

Figura 4.55 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo C com emulsão asfáltica ensaiados após 28 dias de cura.	159
Figura 4.56 - Aspecto dos corpos de prova dos solos A, B e C estabilizados com distribuição de emulsão em gradiente.....	163
Figura 4.57 – Exemplo de padrão de ruptura das amostras em gradiente.	164
Figura 4.58 - Resistência à compressão simples dos solos A, B e C puros e com distribuição homogênea e em gradiente dos teores ótimos de emulsão. .	165
Figura 4.59 - Gráficos comparativos de MR do solo A puro e estabilizado com distribuição de emulsão homogênea e em gradiente.	167
Figura 4.60 - Gráficos comparativos de MR do solo B puro e estabilizado com distribuição de emulsão homogênea e em gradiente.	167
Figura 4.61 - Gráficos comparativos de MR do solo C puro e estabilizado com distribuição de emulsão homogênea e em gradiente.	168
Figura 4.62 - Ilustração do eixo da roda do LWT encostando na borda da fôrma do corpo de prova.	171
Figura 4.63 - Resultados dos ensaios de LWT para o solo A e suas misturas estabilizadas.....	172
Figura 4.64 - Aspecto dos corpos de prova referentes ao solo A após a realização dos ensaios de LWT.	173
Figura 4.65 - Resultados dos ensaios de LWT para o solo B e suas misturas estabilizadas.....	174
Figura 4.66 - Aspecto dos corpos de prova referentes ao solo B após a realização dos ensaios de LWT.	175
Figura 4.67 - Resultados dos ensaios de LWT para o solo C e suas misturas estabilizadas.....	176

Figura 4.68 - Aspecto dos corpos de prova referentes ao solo C após a realização dos ensaios de LWT.	177
Figura 4.69 - Resultados dos ensaios de WTAT para o solo A e suas misturas estabilizadas.	178
Figura 4.70 - Aspecto das amostras de solo A puro e estabilizado em gradiente, após o ensaio de WTAT.	179
Figura 4.71 - Resultados dos ensaios de WTAT para o solo B e suas misturas estabilizadas.	179
Figura 4.72 - Aspecto das amostras de solo B puro e estabilizado em gradiente, após o ensaio de WTAT.	180
Figura 4.73 - Resultados dos ensaios de WTAT para o solo C e suas misturas estabilizadas.	180
Figura 4.74 - Aspecto das amostras de solo C puro e estabilizado em gradiente, após o ensaio de WTAT.	181
Figura 4.75 - Gráfico comparativo dos valores observados para a perda de massa das três amostras de solos estudadas.	183
Figura 4.76 - Estruturas analisadas numericamente.	184

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Demanda de Pavimentação das Estradas Vicinais do Baixo Jaguaribe (Rabêlo, 2006).	3
Tabela 2.1 - Especificações de emulsões asfálticas catiônicas (ABEDA, 2001).	22
Tabela 2.2 - Emulsões recomendadas para cada tipo de serviço (adaptada de ABEDA, 2001).	22
Tabela 2.3 - Efeitos dos diferentes tipos de estabilização sobre alguns tipos de solo (adaptado de Ingles e Metcalf, 1972).....	25
Tabela 2.4 - Critérios recomendados por Yoder e Witczak (1972) para solos a serem estabilizados com betume.	41
Tabela 2.5 - Faixa granulométrica para o solo para estabilização betuminosa (DER-SP, 1991).	41
Tabela 2.6 - Quadro resumo dos requisitos de solos a serem estabilizados (adaptado de Miceli Jr, 2006).....	42
Tabela 2.7 - Parâmetros de dosagem de solo-emulsão (adaptada de Miceli Jr, 2006). ..	46
Tabela 3.1 - Localização e classificação das amostras.	55
Tabela 3.2 - Ensaio para a caracterização geotécnica dos solos.	62
Tabela 3.3 - Ensaio para a caracterização da emulsão asfáltica.....	64
Tabela 3.4 - Pares de tensões utilizados na fase de condicionamento (adaptado de Medina e Motta, 2005).....	76
Tabela 3.5 - Pares de tensões utilizados no ensaio de MR (adaptado de Medina e Motta, 2005).	76
Tabela 4.1 - Densidade Real das amostras de solo em estudo.....	87

Tabela 4.2 - Densidade Real de alguns minerais (adaptado de Lambe e Whitman, 1979).	88
Tabela 4.3 - Resumo da granulometria dos solos e dos limites recomendados para estabilização betuminosa.	89
Tabela 4.4 - Valores dos limites de liquidez e índices de plasticidade dos solos estudados.....	90
Tabela 4.5 - Classificação TRB das amostras em estudo.	91
Tabela 4.6 - Parâmetros c' , d' , e' e P_i da classificação MCT das amostras estudadas. .	92
Tabela 4.7 - Macronutrientes presentes nos solos.	93
Tabela 4.8 - Propriedades químicas dos solos em estudo.....	93
Tabela 4.9 - Resultados da fluorescência de Raios X.....	93
Tabela 4.10 - Valores de CTC de alguns argilominerálias (Santos, 1975 <i>apud</i> Jacintho, 2005).	96
Tabela 4.11 - Valores de Tr para os solos estudados.....	97
Tabela 4.12 - Valores de K_i para os solos A, B e C.	98
Tabela 4.13 - Caracterização da emulsão asfáltica.	101
Tabela 4.14 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para os solos puros.....	110
Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios de RCS e das umidades residuais do solo A estabilizado.	111
Tabela 4.16 - Resultados dos ensaios de RCS e das umidades residuais do solo B estabilizado.	114
Tabela 4.17 - Resultados dos ensaios de RCS e das umidades residuais do solo C estabilizado.	116

Tabela 4.18 - Umidades residuais dos corpos de prova de solo A-Miceli.....	118
Tabela 4.19 - Resultados de RTI e das umidades residuais das misturas do solo A com emulsão asfáltica.....	127
Tabela 4.20 - Resultados de RTI e das umidades residuais das misturas do solo B com emulsão asfáltica.....	129
Tabela 4.21 - Resultados de RTI e das umidades residuais das misturas do solo C com emulsão asfáltica.....	131
Tabela 4.22 - RTI máximas obtidas para os solos A, B e C.	132
Tabela 4.23 - Valores típicos de RT para misturas asfálticas (adaptado de Bernucci <i>et al.</i> , 2007).....	132
Tabela 4.24 - Parâmetros dos modelos Clássicos de Resiliência para os solos A, B e C.	141
Tabela 4.25 - Parâmetros do modelo Composto para os solos A, B e C.....	142
Tabela 4.21 - Resultados de RTI e das umidades residuais das misturas do solo C com emulsão asfáltica.....	149
Tabela 4.26 - Parâmetros de resistência das amostras de solo puras e estabilizadas em seus teores ótimos.	162
Tabela 4.27 - Parâmetros do modelo composto para as amostras dos solos A, B e C estabilizadas com distribuição da emulsão em gradiente.	166
Tabela 4.28 - Parâmetros que descrevem o comportamento dos materiais empregados na análise mecanística.	185
Tabela 4.29 - Resultados do dimensionamento da Estrutura 1, para um número N de 10^6	187
Tabela 4.31 - Resultados do dimensionamento da Estrutura 2.....	188

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEDA (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto)

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)

ADP (Asfalto Diluído do Petróleo)

ASTM (American Society for Testing and Materials)

ATR (Afundamento da Trilha de Roda)

BBD (BIRD/BNDES/BID)

BID (Banco Interamericano de Desenvolvimento)

BIRD (Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento)

BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social)

CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo)

CBR (California Bearing Ratio)

COPPE (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Coordenação de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da UFRJ)

CP (Corpo de prova)

CTC (Capacidade de troca catiônica)

DAER (Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem)

DCP (Dynamic Cone Penetrometer)

DER-SP (Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo)

DERT/CE (Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes do Estado do Ceará)

DET (Departamento de Engenharia de Transportes)

DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem)

DNIT (Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes)

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária)

EME (Misturas de Módulo Elevado)

HRB (Highway Research Board)

IP (Índice de Plasticidade)

IPECE (Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Estado do Ceará)

IPLANCE (Fundação Instituto de Planejamento do Ceará)

ISC (Índice de Suporte Califórnia)

LA-1C (Emulsão Asfáltica Catiônica para Lama Asfáltica)

LAE (Emulsão Asfáltica Não Iônica para Lama Asfáltica)

LCC (Líquido da Castanha de Caju)

LL (Limite de liquidez)

LMP (Laboratório de Mecânica dos Pavimentos)

LMSP (Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação)

LP (Limite de plasticidade)

LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

LWT (Loaded Wheel Test)

MCT (Miniatura, Compactado, Tropical)

MCV (Moisture Condition Value)

MO (Matéria Orgânica)

MEAS (Massa Específica Aparente Seca Máxima)

MR (Módulo de Resiliência)

MVS (Moisture Vapor Susceptibility)

NL (Não Líquido)

NP (Não Plástico)

NBR (Norma Brasileira)

O/W (oil in water)

pH (Potencial Hidrogeniônico)

PMF (Pré-Misturado a Frio)

RCD (Resíduo Sólido de Construção e Demolição)

RCS (Resistência à Compressão Simples)

RL (Ruptura Lenta)

RL-1C (Emulsão Catiônica de Ruptura Lenta)

RM (Ruptura Média)

RM-1C (Emulsão Catiônica de Ruptura Média)

RM-2C (Emulsão Catiônica de Ruptura Média)

RMF (Região Metropolitana de Fortaleza)

RR (Ruptura Rápida)

RR-1C (Emulsão Catiônica de Ruptura Rápida)

RR-2C (Emulsão Catiônica de Ruptura Rápida)

RTI (Resistência à Tração Indireta)

SDA (Secretaria do Desenvolvimento Agrário)

SEAGRI (Secretaria de Agricultura e Pecuária)

SMA (Stone Matrix Asphalt)

TRB (Transportation Research Board)

TSS (Tratamento Superficial Simples)

UFC (Universidade Federal do Ceará)

UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro)

W/O (water in oil)

WTAT (Wet Track Abrasion Test)

LISTAS DE SÍMBOLOS

$\%Al$ - Saturação de Alumínio

$\%V$ - Saturação de Bases

c' - Coeficiente de deformabilidade da classificação MCT

d' - Coeficiente que caracteriza o ramo seco da curva de compactação obtida pelo método MCT

ΔpH - Diferença entre o pH em KCl e o pH em água

D_{adm} - Deflexão máxima admissível na superfície

e' - Índice da classificação MCT calculado em função de P_i e d'

k_1, k_2, k_3, k_4 - Coeficientes das equações de módulo resiliente

K_i - Relação Sílica-Alumina

K_r - Relação Sílica-Sesquióxidos

$MR_{médio}$ - Valor médio do módulo de resiliência do subleito

N_p - Número N para o período de projeto

P_i - Perda de massa por imersão

R^2 - Coeficientes de correlação

S - Soma dos cátions trocáveis

TR - Atividade das argilas

ϵ_p - Deformação permanente ou plástica

ϵ_r - Deformação resiliente

θ - Invariante de tensões

σ_1 - Tensão principal maior

σ_3 - Tensão principal menor ou tensão de confinamento

σ_d - Tensão desvio atuante

$\sigma_{t adm}$ - Tensão de tração admissível

σ_t - Tensão de tração atuante

$\sigma_{v adm}$ - Tensão vertical admissível no subleito

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A economia mundial encontra-se, atualmente, em uma conjuntura globalizada, caracterizada pela redução de fronteiras comerciais e pelo livre comércio entre os diversos países. De acordo com Santiago (2005), com a abertura dos mercados internos, os países desenvolvidos, sendo mais estruturados econômica e tecnologicamente, tornaram injusta a competição econômica internacional para os países menos abastados.

Diante deste quadro de alta competitividade, foi necessário que os países emergentes assumissem uma postura mais empreendedora, pautada no fortalecimento de suas potencialidades naturais. Para o Brasil, país de dimensões continentais, tornou-se importante a criação de um modelo que possibilitasse o desenvolvimento integrado das regiões, baseado no fortalecimento das economias locais.

Neste contexto, surgiu em 1997, como parte de uma ação integrada do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão e o Banco do Nordeste, o projeto Pólos de Desenvolvimento Integrado. Este projeto busca assegurar um ambiente favorável de cooperação e negociação estratégica entre os diversos segmentos sociais de uma determinada área, com o objetivo de promover o desenvolvimento sustentável, elevando a eficiência das cadeias produtivas, conduzindo-as ao aumento da competitividade (Carvalho e Cabral, 2003).

Segundo Carvalho e Cabral (2003), o projeto foi desenvolvido a partir da estruturação de treze pólos, com eixos econômicos centrados na irrigação, produção de grãos e frutas cítricas, pecuária de leite e turismo rural. Entre estes pólos, dois se situam no estado do Ceará: o Pólo de Cariri Cearense e o Pólo do Baixo Jaguaribe.

Acompanhando essa tendência do crescimento econômico baseado no desenvolvimento das potencialidades locais, o Governo do Estado do Ceará lançou, em 1998, o projeto Agropólos, visando a promoção das atividades agroindustriais. Nesse ano foram implantados seis agropólos no estado: Ibiapaba, Baixo Acaraú,

Metropolitano, Baixo Jaguaribe, Centro-Sul e Cariri, ilustrados na Figura 1.1. Atualmente, o território do Estado do Ceará encontra-se dividido em 18 agropólos.

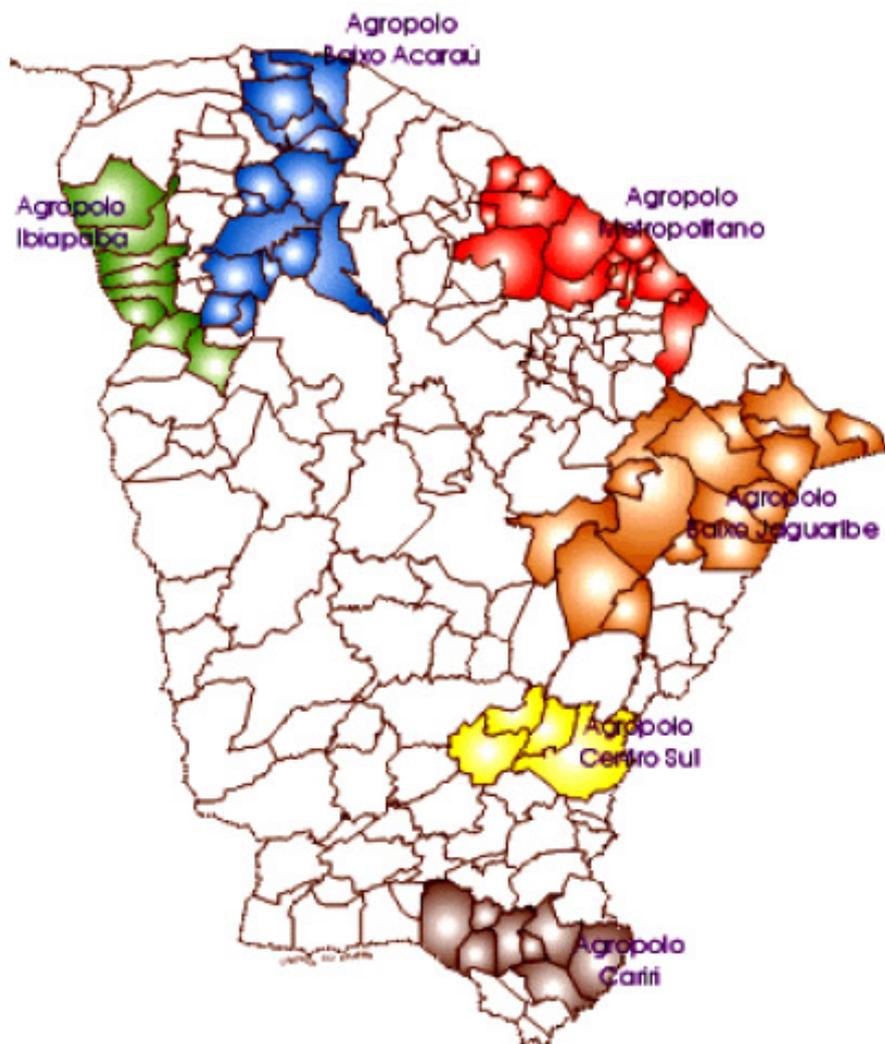


Figura 1.1 - Mapa dos Agropólos do Ceará à data da concepção do Projeto Agropólos. (SEAGRI, 2001 *apud* Santiago, 2005)

A escolha do Baixo Jaguaribe como uma das áreas de atuação do Projeto Pólos do Desenvolvimento Integrado e do Projeto Agropólos mostra a importância econômica dessa região para os cenários regional e estadual. Este agropólo apresenta grande vocação ao crescimento, devido, principalmente, à implantação de projetos de irrigação, englobando, segundo Rabêlo (2006), 37% da área total irrigada do Estado do Ceará. Além disso, Carvalho e Cabral (2003) comentam que os projetos de irrigação públicos implantados na região contam com sistemas modernos e com a disponibilidade de área para expansão.

Entre outras vantagens competitivas do Agropólo do Baixo Jaguaribe, Rabêlo (2006) cita ainda a disponibilidade de terras situadas em áreas favoráveis à exploração da agricultura mecanizada, a abundância de mão-de-obra, e a proximidade dos principais mercados consumidores do Nordeste do Brasil. Em contrapartida, Carvalho e Cabral (2003) apontam entre os fatores restritivos ao desenvolvimento deste pólo as deficiências quanto à pavimentação, sinalização e conservação das estradas vicinais.

De fato, grande parte dos produtos agrícolas produzidos nessa região é transportada em rodovias vicinais não pavimentadas que apresentam péssimas condições de tráfego. De acordo com Rabêlo (2006), em 2005 a SDA (Secretaria do Desenvolvimento Agrário), na época SEAGRI (Secretaria da Agricultura e Pecuária), informou uma demanda reprimida por melhoria de pavimentação em cerca de 235 km de rodovias dessa região, conforme apresentado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Demanda de Pavimentação das Estradas Vicinais do Baixo Jaguaribe (Rabêlo, 2006).

It	Trecho	Município	Ext. (km)	Revestimento Atual
1	Limoeiro do Norte / FAPIJA	Limoeiro	13	Rev. Primário
2	Acesso aos Pivôs 7.1, 7.2 e 4.1	Limoeiro	10	Rev. Primário
3	Acesso ao Projeto Inthor	Limoeiro	7	Rev. Primário
4	Cabeça Preta / Lagoinha Via Tomé	Limoeiro	20	Rev. Primário
5	Jaguaruana / Perímetro Irrigado	Jaguaruana	5	Rev. Primário
6	BR-304 / Cajazeiras / Ass.Campos Verdes	Aracati	10	Rev. Primário
7	BR-304 / Agrícola Cajazeiras	Aracati	22	Rev. Primário
8	Tabuleiro do Norte / Projeto Altinho	Tabuleiro	7	Rev. Primário
9	BR-116 / Morada Nova	Morada Nova	26	Rev. Primário
10	Morada Nova / Beira Rio	Morada Nova	30	Rev. Primário
11	Tabuleiro do Norte / Olho D'água da Bica	Tabuleiro	30	Rev. Primário
12	BR-116 / CE - 046	Limoeiro	33	Rev. Primário
13	Local. Alto Ferrão ao Condomínio Itaiçaba	Itaiçaba	2	Rev. Primário
14	BR-304 até o Projeto Agrícola Santa Fé	Aracati	3	Rev. Primário
15	Proj. Organic Holdings - Estrada do Melão	Quixeré	12	Rev. Primário
16	Município de Itaiçaba - Local. de Alto Ferrão	Itaiçaba	4,77	Rev. Primário
TOTAL			234,77	

As condições de trafegabilidade das rodovias existentes na região acabam comprometendo a qualidade dos produtos, dificultando o atendimento aos padrões exigidos pelo mercado consumidor. Assim, com o impulso do desenvolvimento agrícola, o melhoramento da infra-estrutura rodoviária local faz-se urgente.

Apesar de ser comprovada a necessidade de investimentos no setor, o baixo volume de tráfego registrado na malha rodoviária do Agropólo do Baixo Jaguaribe torna

a demanda economicamente inviável. Outro fator que aumenta a inviabilidade dos empreendimentos é a dificuldade de encontrar materiais de boa qualidade nas proximidades dos leitos das rodovias, originando altas despesas com transporte de materiais. A junção desses fatores torna necessária a adoção de soluções alternativas de pavimentação, tendo em vista a redução de custos e a conseqüente viabilidade econômica dos empreendimentos rodoviários na região. Em outras palavras, a solução é investir em rodovias de baixo custo.

A construção de rodovias de baixo custo consiste na maximização do uso de materiais locais, do emprego de materiais alternativos, da redução da espessura das camadas de base e revestimento e do emprego de técnicas pautadas na experiência local. Observa-se que todas estas ações consistem da adoção de medidas pouco conservadoras no quesito segurança, o que torna ainda mais importante a realização de investigações técnicas e científicas das alternativas, visando atestar sua aplicabilidade em pavimentação. Algumas pesquisas vêm sendo desenvolvidas no âmbito do estado do Ceará, pautadas principalmente na otimização do uso de materiais locais e no emprego de materiais alternativos.

No que se refere às investigações científicas sobre a maximização do uso de materiais locais, vale ressaltar os seguintes trabalhos: Barroso (2002), que investigou os solos ocorrentes na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) numa tentativa de identificar suas potencialidades para construção de rodovias; Souza Júnior (2005), que estudou a influência da adoção de uma maior energia de compactação (Energia Intermodificada) no Índice de Suporte Califórnia e no comportamento resiliente de amostras de solo distribuídas no Estado do Ceará; Silva Júnior *et al.* (2008) que investigaram a estabilização granulométrica de solos a partir da adição de areia de rio.

Com relação às pesquisas que investigam o uso de materiais alternativos para pavimentação, citam-se: Rabêlo (2006), que realizou um estudo sobre os fatores que interferem na penetração da imprimação betuminosa em camadas de bases, bem como a utilização do Líquido da Castanha de Caju (LCC) como um solvente alternativo; Loiola e Barroso (2007), que trataram de um estudo de laboratório e do processo construtivo de um trecho de 40 km realizado no estado com o emprego da técnica de estabilização de

solos a partir da adição de cal; Silva *et al.* (2008) que trata da aplicação de resíduos da construção e demolição (RCD) em pavimentos de baixo volume de tráfego na RMF.

Encontram-se atualmente em andamento no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (LMP-UFC) pesquisas que avaliam a estabilização química de solos a partir da adição da pasta de cal e a estabilização granulométrica dos solos com o emprego de resíduos sólidos de construção e demolição (RCD).

Com relação às investigações de ordem técnica, durante o desenvolvimento do Projeto PC01 - “Desenvolvimento de Tecnologias para o Uso de Revestimentos Asfálticos em Rodovias Vicinais de Agropólos do Nordeste”, da Rede Asfalto N/NE, a equipe da UFC, participante deste projeto, realizou um levantamento de dados, junto ao DERT/CE (hoje DER), sobre os pavimentos de baixo custo construídos no estado. Verificou-se que várias técnicas de construção vêm sendo empregadas desde a metade da década de 70. Entre essas, destacou-se, durante a década de 80, o emprego de mistura solo-asfalto como revestimento de estradas de baixo volume de tráfego, técnica base do Projeto Jaguaribe.

O Projeto Jaguaribe foi implantado em 1981 pelo Governo do Ceará, por meio do Programa BBD (BIRD-BNDES-BID), e consistiu da construção de aproximadamente 200 km de rodovias vicinais revestidas em solo-asfalto. No entanto, o projeto não contou com uma política de conservação das rodovias construídas, uma vez que o foco era a redução de custos com manutenção. Com a elevação dos preços dos materiais betuminosos, essa solução tornou-se dispendiosa e logo foi abandonada. A técnica solo-emulsão ficou, então em desuso por cerca de 25 anos. A Figura 1.2 ilustra trechos de rodovias em revestimento primário, apresentando resquícios do emprego de técnica solo-betume no estado do Ceará.



Figura 1.2 - Resquícios do emprego da técnica solo-betume no estado do Ceará (Arquivo pessoal do Prof. Franklin José Chaves)

Rabêlo (2006) ressalta que não se dispõe de registros no DERT/CE que possam fornecer maiores dados sobre a utilização da técnica solo-asfalto. Mesmo porque o emprego da técnica se deu de forma empírica, baseada na experiência dos técnicos envolvidos no projeto, conforme afirmou o Engenheiro Francisco Baima Barbosa (atual Presidente da Empresa Asfaltos Nordeste), integrante da equipe envolvida, em entrevista realizada em novembro de 2007. Segundo o entrevistado, os pavimentos foram executados sem a prévia realização de um estudo de dosagem ou de um estudo de laboratório conclusivo sobre o comportamento mecânico das misturas, indicando o pouco domínio sobre as variáveis que interferem na qualidade da estabilização betuminosa.

Em contrapartida, o Engenheiro entrevistado comentou sobre um trecho da técnica solo-asfalto executado no estado do Piauí que após 12 anos, sem a intervenção de manutenções, ainda apresentava ótimas condições estruturais, o que dá indícios da possibilidade de utilização da técnica com sucesso. Além disso, as regiões como o agropólo do Baixo Jaguaribe, que apresentam clima seco, topografia pouco acidentada e baixos índices pluviométricos, são apontados pelo Road Research Laboratory (1951) e por Moreira (2002) como as regiões mais indicadas para a estabilização betuminosa de solos.

Diante do exposto, acredita-se que o abandono da técnica da estabilização betuminosa pelo Projeto Jaguaribe seja resultado da falta de uma política de

manutenção, ou do não entendimento das variáveis envolvidas no processo, e não por insucessos de ordem técnica.

Desta forma, é possível enunciar o problema que motivou a realização desta pesquisa: i) a técnica solo-betume para a construção de rodovias de baixo custo, no estado do Ceará, foi abandonada sem que houvesse o domínio dos fatores que regem o seu comportamento; ii) com a retomada do crescimento econômico do Agropólo do Baixo Jaguaribe e a conseqüente necessidade de soluções econômicas para o aprimoramento da sua malha viária, torna-se imprescindível a investigação de técnicas alternativas que reduzam os custos envolvidos na construção de rodovias na região.

Assim, resolveu-se investigar a técnica solo-emulsão, abandonada há 25 anos, visando sua aplicação às rodovias de baixo volume de tráfego do Agropólo supracitado.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica da utilização de emulsão asfáltica para estabilização de solos, visando o emprego em camadas de base de rodovias de baixo volume de tráfego no Agropólo do Baixo Jaguaribe.

Buscando alcançar o objetivo principal deste trabalho, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- a) verificar o melhor processo para a mistura da técnica solo-emulsão;
- b) verificar a influência do teor de emulsão aplicada ao solo;
- c) avaliar as modificações na misturas ocorridas devido aos diferentes tempos de cura;
- d) observar os efeitos da forma de distribuição da emulsão no solo;
- e) verificar a influência da estabilização betuminosa na resistência mecânica das misturas;
- f) avaliar a resistência ao desgaste e à abrasão das misturas betuminosas investigadas.

O estudo aqui desenvolvido buscou também identificar os padrões de comportamento das misturas solo-emulsão, correlacionando-os com suas características físicas, químicas e mineralógicas das amostras de solo em estudo, com o intuito de fornecer subsídios para futuros desenvolvimentos científicos.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia empregada para o alcance dos objetivos deste trabalho consistiu da realização das seguintes tarefas:

- a) realização de uma revisão bibliográfica sobre emulsões asfálticas e estabilização betuminosa de solos;
- b) escolha e coleta das amostras de solo a serem estudadas, baseando-se nas condições de clima, relevo e nas classes pedológicas de maior ocorrência na região estudada;
- c) realização de ensaios de caracterização geotécnica, química e mineralógica das amostras de solo selecionadas;
- d) escolha e caracterização da emulsão asfáltica;
- e) realização de ensaios de resistência mecânica com os solos e com as misturas solo-emulsão, visando a identificação do comportamento mecânico e do teor ótimo de cada mistura;
- f) realização de ensaios para a avaliação da resistência ao desgaste das amostras de solo estabilizadas com emulsão;
- g) avaliação dos resultados obtidos nos ensaios;
- h) proposição de soluções técnicas, a partir da análise dos resultados gerados.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por 5 capítulos e um anexo, descritos como se segue.

Após este capítulo de introdução, onde são apresentados os objetivos e a metodologia a ser empregada para a realização desta pesquisa, segue o Capítulo 2, que consta da revisão bibliográfica. No Capítulo 2 são abordados os conceitos relacionados às emulsões asfálticas, à estabilização de solos e às peculiaridades das misturas solo-emulsão.

O processo de escolha das amostras de solo estudadas e a descrição dos procedimentos utilizados para a realização das misturas e dos ensaios laboratoriais realizados nesta pesquisa encontram-se explanados no Capítulo 3.

O Capítulo 4 destina-se à apresentação e à análise dos resultados obtidos dos ensaios, procurando identificar os padrões de comportamento apresentados pelas amostras de solo-emulsão.

No Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões obtidas a partir da análise de resultados, as recomendações técnicas para a utilização das misturas solo-emulsão e as sugestões para futuras pesquisas.

O Anexo 1 consiste de um algoritmo utilizado na confecção dos gráficos de módulo de resiliência, que possibilitou a avaliação qualitativa da influência da adição de emulsão asfáltica sobre o comportamento resiliente das amostras de solo estudadas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo tem a finalidade de reunir informações que subsidiem as investigações sobre a técnica solo-emulsão. Esta revisão bibliográfica foi dividida em três tópicos: Emulsões Asfálticas, Estabilização de Solos e Estabilização Betuminosa.

Neste contexto, buscou-se abordar as peculiaridades, o processo de fabricação e a classificação das emulsões asfálticas, os mecanismos de estabilização de solos, as particularidades dos sistemas solo-emulsão e as experiências anteriores relativas a utilização desta técnica.

2.2 EMULSÕES ASFÁLTICAS

O asfalto é um dos mais antigos materiais de construção. Suas características coesivas e impermeabilizantes, conhecidas pelas mais antigas civilizações, permitiram diversas aplicações deste material. Segundo Roberts *et al.* (1996), existem indícios da utilização do asfalto 6.000 anos antes da era Cristã, na indústria naval da Suméria, em 3.000 A.C., na construção de grandes banheiros em uma antiga civilização do noroeste indiano e a partir de 2600 A.C., em serviços de impermeabilização, mumificação e construção de estruturas no Egito. Até os dias de hoje, o asfalto continua a ser utilizado como argamassa e impermeabilizante nas mais diversas obras em todo o mundo.

Em pavimentação, esse material tem especial importância, pois as misturas asfálticas são a principal forma de revestimento de rodovias em todo o mundo. No Brasil, de acordo com Bernucci *et al.* (2007), cerca de 95% das rodovias pavimentadas apresentam revestimento asfáltico. As principais vantagens da aplicação desse material em pavimentação relacionam-se à sua durabilidade, impermeabilidade, ação coesiva e capacidade de resistir às ações de ácidos, sais e álcalis. O asfalto apresenta ainda viscosidade muito elevada, de forma que a sua mistura com agregados minerais resulta em um material resistente e flexível.

No entanto, devido a essa alta viscosidade, o asfalto é um material de difícil trabalhabilidade. De acordo com Hunter (2000), para que haja o recobrimento efetivo do agregado, a viscosidade do asfalto deve ser aproximadamente 0,2 Pa.s (2 poise). Ressalta ainda que, para atingir essa viscosidade, é necessário que o asfalto e o agregado sejam aquecidos em temperaturas apropriadas. Contudo, o aquecimento desses materiais é uma das principais dificuldades enfrentadas para a produção de misturas asfálticas, uma vez que o uso de aquecedores acarreta custos elevados.

Com o intuito de evitar o processo de aquecimento, tornou-se necessário encontrar outros métodos para a redução da viscosidade do asfalto, de maneira que este material apresentasse boa trabalhabilidade à temperatura ambiente. Assim, surgiram os asfaltos diluídos e, posteriormente, as emulsões asfálticas.

Omena e Antoszczem Junior (2006) contam que os primórdios da história das emulsões asfálticas datam do início do século XX, sendo a sua primeira patente requerida nos EUA em 1903. De acordo com ABEDA (2001), a produção em escala industrial das emulsões asfálticas teve início dois anos mais tarde, na cidade de Lutterbach na França, com o químico Emile Feigel.

Omena e Antoszczem Junior (2006) relatam que, na década de 20, as emulsões asfálticas, que eram aplicadas em tratamento contra-pó (ver Figura 2.1), passaram a ser usadas em forma de spray, na construção de macadames betuminosos.



Figura 2.1 - Aplicação de emulsão asfáltica no início do século XX (Omena e Antoszczem Junior, 2006).

Em 1951, a Esso, na França, promoveu um grande impulso na utilização das emulsões asfálticas quando colocou à disposição do mercado as emulsões catiônicas. Nesse país, durante a década de 60, foram construídos mais de 1.300.000 km de vias rurais e secundárias a partir do emprego de emulsão asfáltica (ABEDA, 2001). No Brasil, a chegada das emulsões asfálticas se deu em 1962, pela empresa Chevron Asfaltos, por intermédio do engenheiro químico Jean Claude Vogt.

Atualmente, os maiores consumidores de emulsões asfálticas são os Estados Unidos e França, consumindo, respectivamente, cerca de 2.300.000 toneladas e 1.010.000 toneladas por ano. No Brasil, a produção anual é de cerca de 500.000 toneladas de emulsão asfáltica.

Nos itens a seguir serão abordados a definição, o processo de fabricação, as propriedades, as designações, as especificações e aplicações das emulsões asfálticas.

2.2.1 Definição

Uma emulsão pode ser definida como uma mistura heterogênea de dois ou mais componentes não miscíveis entre si, onde pelo menos um desses se apresenta de forma contínua (fase dispersante) e outro se apresenta disperso (fase dispersa).

Para conferir estabilidade a uma mistura de componentes imiscíveis é necessária a utilização de uma agitação mecânica constante ou de uma substância que retarde a separação das fases (ver Figura 2.2). Essa substância é conhecida como agente emulsificante.

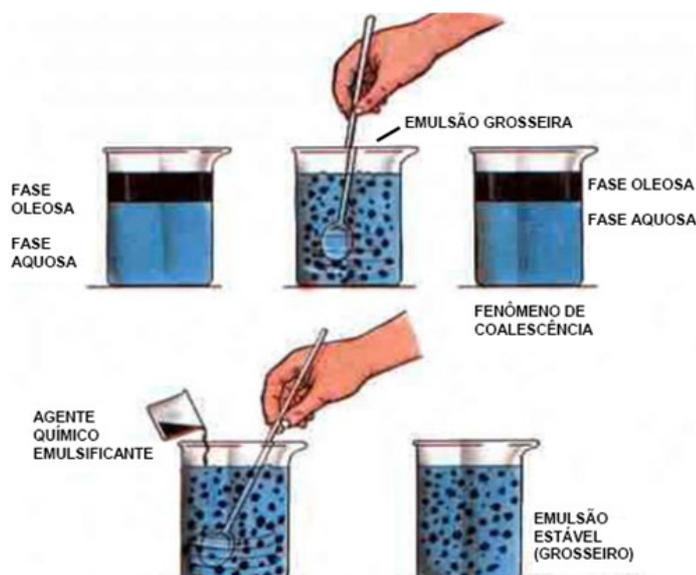


Figura 2.2 - Fenômenos envolvidos na mistura de duas substâncias imiscíveis (Bernucci *et al.*, 2007).

O agente emulsificante tem a função de reduzir a tensão superficial entre as fases de uma emulsão, e evitar a coalescência (junção das partes separadas) da fase dispersa.

As emulsões são comumente constituídas por duas fases, sendo uma de natureza polar e outra de natureza apolar. Quando a fase dispersante é constituída pela substância de natureza polar a emulsão é dita direta (O/W- *oil in water*), caso contrário, é dita inversa (W/O - *water in oil*).

Uma emulsão asfáltica é uma emulsão do tipo O/W de cimento asfáltico disperso em uma fase aquosa composta por ácido, emulsificante, água e solvente. A Figura 2.3 ilustra uma gota de emulsão asfáltica ampliada 1000 vezes, onde podem ser observados os glóbulos de cimento asfáltico dispersos em uma solução aquosa.

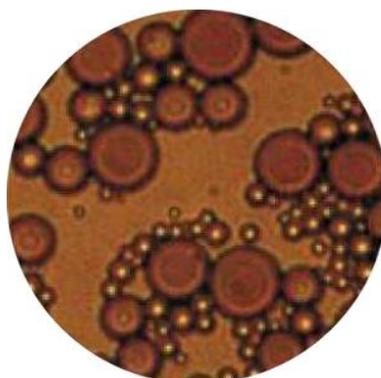


Figura 2.3 - Gota de emulsão asfáltica ampliada 1000 vezes (Omena e Antoszczem Junior, 2006).

Descreve-se a seguir as particularidades do processo empregado na fabricação das emulsões asfálticas, que consiste na dispersão do betume em uma solução aquosa.

2.2.2 Fabricação das Emulsões Asfálticas

O processo de fabricação da emulsão asfáltica consiste em fragmentar o cimento asfáltico de petróleo (CAP) em glóbulos pequenos e fazê-los permanecerem suspensos em água por um determinado período.

De acordo com ABEDA (2001), para a produção da emulsão asfáltica, inicialmente aquece-se o cimento asfáltico a uma temperatura de aproximadamente 140°C e a fase aquosa a uma temperatura de aproximadamente 55°C. Soares (2006)

complementa que, a determinação da temperatura do CAP se dá de forma que a viscosidade deste não ultrapasse 2 poise e que a temperatura da fase aquosa seja determinada de forma que a temperatura final da mistura resulte em um valor menor que 90°C.

Em seguida, esses componentes aquecidos são passados, sob pressão, em um moinho coloidal, onde o CAP será triturado e suspenso na água. Para Soares (2006), esse processo é dificultado pela coesão interna e viscosidade do asfalto, bem como pela tensão superficial que resiste a criação de novas interfaces. Assim, para obter uma emulsão asfáltica são necessários:

1. uma energia de dispersão, representada pela ação mecânica imposta pelo moinho para a quebra do cimento asfáltico;
2. um agente emulsificante, que tem a função principal de reduzir a tensão superficial, evitando que estes glóbulos de asfalto coalesçam. A concentração e o tipo de agente emulsificante têm relação direta com as propriedades das emulsões, conforme será abordado no próximo item.

A Figura 2.4 apresenta o processo de fabricação das emulsões asfálticas e a Figura 2.5 ilustra uma instalação de uma fábrica de emulsão asfáltica.

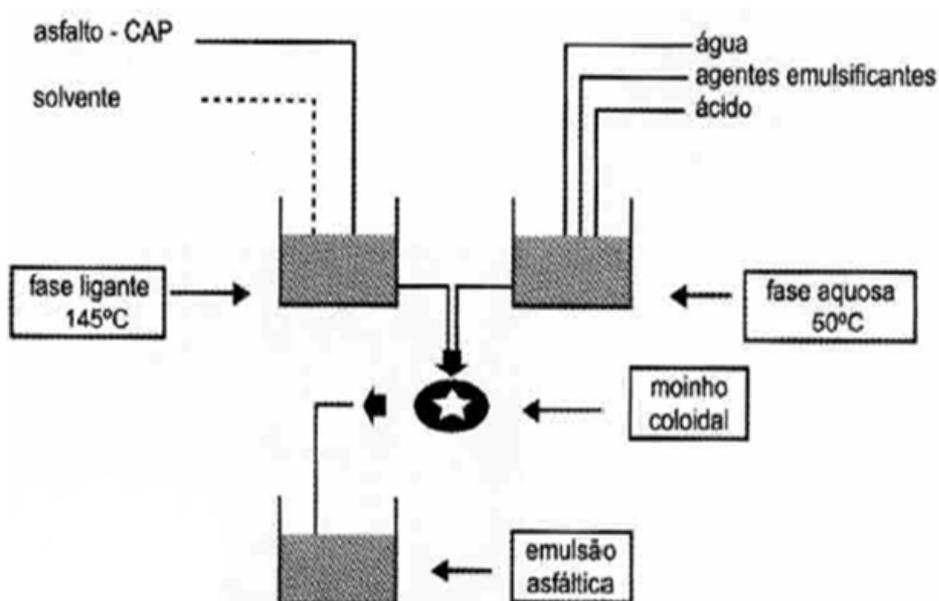


Figura 2.4 - Esquema de Produção de Emulsão Asfáltica (ABEDA, 2001).



Figura 2.5 - Instalação de uma fábrica de emulsão asfáltica.

2.2.3 Propriedades das Emulsões Asfálticas

O comportamento das emulsões asfálticas é influenciado pelas suas diversas propriedades como o tipo de carga das partículas betuminosas, a velocidade em que se processa a separação entre a fase dispersante e a fase dispersa, viscosidade Saybolt Furol, teor de solvente e resíduo de destilação.

Dentre essas propriedades, a carga da partícula e a velocidade de separação das fases (conhecido como ruptura) são as que exercem maior influência sobre o comportamento e a aplicabilidade das emulsões asfálticas, conforme é abordado nos itens a seguir.

2.2.3.1 Carga da Partícula

O tipo de carga das partículas das emulsões é conferido pelos agentes emulsificantes. Os emulsificantes são eletrólitos que quando colocados em água se dissociam em ânions e cátions. Soares (2006) afirma que uma molécula de emulsificante consiste em uma longa cadeia hidrocarbonada que termina com um grupo funcional catiônico ou aniônico. A parte apolar desta cadeia tem afinidade pelo betume (lipofílica) enquanto a parte polar tem afinidade pela água (hidrofílica).

A parte apolar da molécula, devido a sua afinidade pelo betume fixa-se nos glóbulos de asfalto, enquanto a parte polar projeta-se para o meio aquoso, conferindo uma carga à superfície dos glóbulos, conforme ilustrado na Figura 2.6.

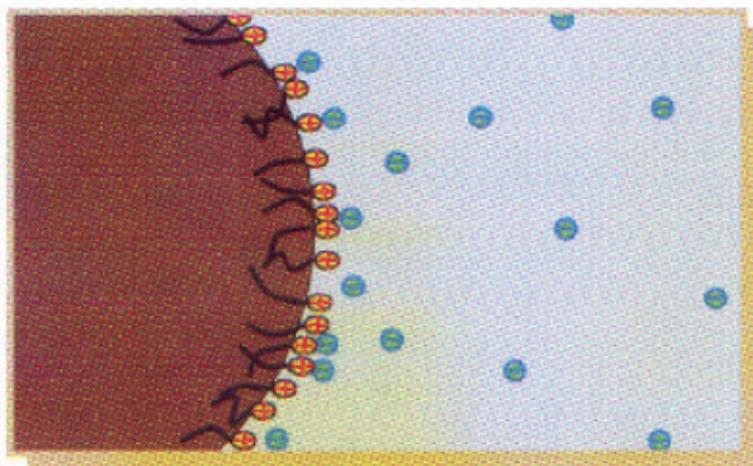


Figura 2.6 - Comportamento do emulsificante na emulsão (Soares, 2006).

Desta forma, o agente emulsificante impõe uma carga elétrica à superfície das partículas suspensas de asfalto, causando repulsão entre elas e evitando, assim, que a fase dispersa da emulsão coalesça. Esse é o método pelo qual o agente emulsificante mantém a estabilidade da dispersão.

O tipo de agente emulsificante que gerará a carga da partícula é uma forma de classificar as emulsões. Se as partículas de asfalto forem carregadas positivamente a emulsão é dita catiônica (ver Figura 2.7). Se a carga destes for negativa, a emulsão é dita aniônica (ver Figura 2.8).

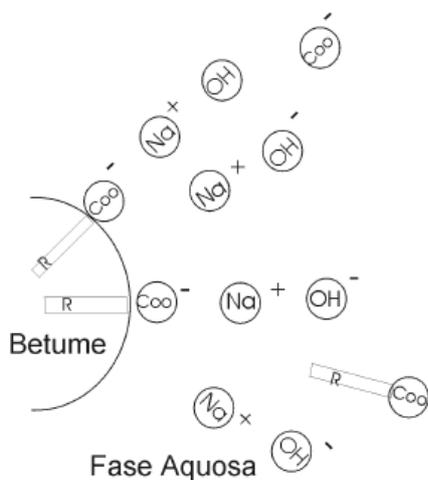


Figura 2.7 - Emulsão Aniônica (Soares, 2006)

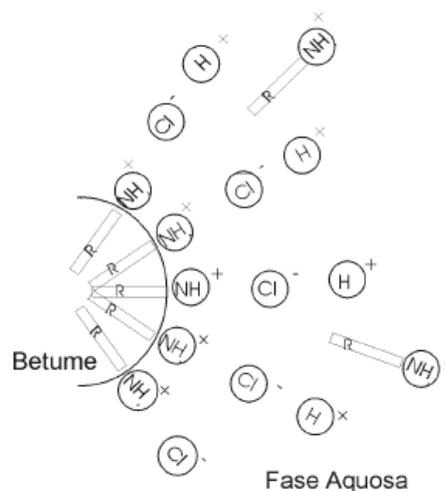


Figura 2.8 - Emulsão Catiônica (Soares, 2006)

Os emulsificantes utilizados na produção de emulsões aniônicas constituem-se de um sabão alcalino, resultante da saponificação de um ácido graxo por uma base forte (normalmente, hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio). Por serem geradas a partir da adição de um sabão alcalino, as emulsões asfálticas aniônicas são também conhecidas por emulsões alcalinas. Para a produção das emulsões catiônicas, os agentes emulsificantes empregados são sabões ácidos (sais de amina), resultantes da reação de uma base fraca com um ácido forte (ácido clorídrico, geralmente). Essas emulsões são ditas ácidas, devido à acidez característica do agente emulsificante (Ferreira, 1980; Soares, 2006).

As emulsões aniônicas foram as primeiras emulsões asfálticas fabricadas. Ferreira (1980) revela que as emulsões asfálticas catiônicas foram desenvolvidas com o intuito de resolver problemas de campo onde as emulsões aniônicas não pudessem ser empregadas, como em situações onde ocorram reações não satisfatórias com os agregados, por exemplo.

A inspiração para a produção da emulsão catiônica consistiu do princípio de que a superfície dos glóbulos de asfalto da emulsão aniônica, sendo carregada negativamente, é fortemente atraída pelos agregados eletropositivos. De maneira análoga, a carga positiva sobre a superfície dos glóbulos de asfalto de uma emulsão catiônica seria atraída pela superfície carregada de agregados eletronegativos.

Desta forma, as emulsões aniônicas devem desenvolver uma forte ligação com agregados de natureza calcária (calcáreo e basalto, por exemplo), enquanto as emulsões catiônicas apresentem boa adesividade com agregados de origem granítica (como o quartzo e o granito).

Atualmente, devido ao seu melhor desempenho, as emulsões asfálticas catiônicas são as mais empregadas em serviços de pavimentação (Hunter, 2000; ABEDA, 2001; Soares, 2006; Bernucci *et al.*, 2007).

2.2.3.2 *Ruptura*

Para que uma emulsão asfáltica cumpra seu papel em pavimentação é necessário que ocorra a separação entre a fase dispersante e a fase dispersa, de forma que os

glóbulos de asfalto se unam e comecem a desenvolver as propriedades de ligantes. Este processo é conhecido como ruptura.

O processo de ruptura tem início no momento que a emulsão asfáltica entre em contato com a superfície do agregado. A superfície ionizada do agregado atrai os glóbulos carregados de asfalto, desfazendo o frágil equilíbrio entre as fases da emulsão. Os glóbulos de asfalto que compunham a fase dispersa se unem novamente envolvendo o agregado com um filme betuminoso, enquanto ocorre a evaporação da água que compunha a fase dispersante. O processo de ruptura é ilustrado na Figura 2.9, onde pode ser observada a coalescência dos glóbulos de betume e a formação do filme betuminoso sobre a superfície do agregado.

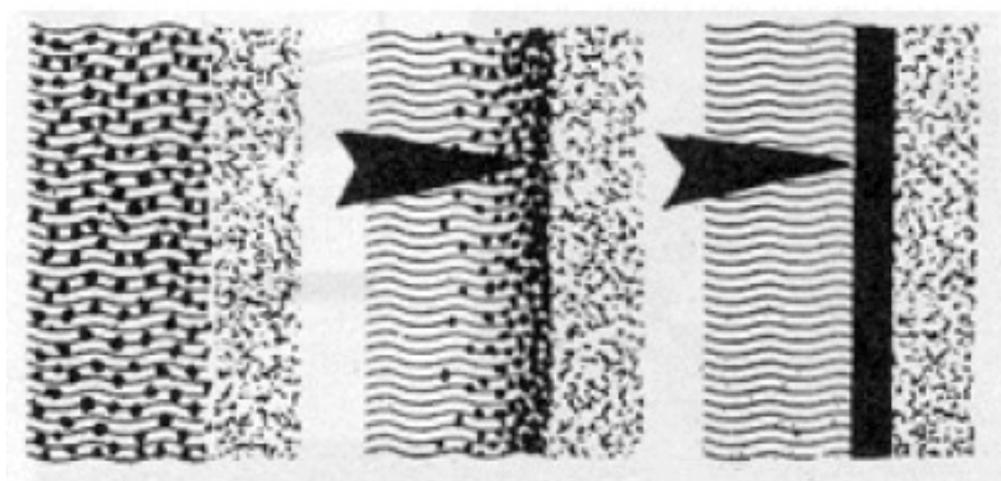


Figura 2.9 - Coalescência na interface emulsão/agregado (Soares, 2006)

A velocidade na qual se processa a separação das fases e a formação do filme betuminoso é variável para os diferentes tipos de emulsão, sendo influenciada principalmente pela dosagem e a composição química do agente emulsificante (Soares, 2006). Dependendo da velocidade em que se processa a ruptura, as emulsões podem ser classificadas como de ruptura rápida (RR), ruptura média (RM) ou ruptura lenta (RL).

As emulsões de ruptura rápida (RR) são emulsões instáveis pois, via de regra, elas têm pequena concentração de emulsificante, o que a torna susceptível a ruptura até mesmo por pequenos distúrbios (Ferreira, 1980). O rompimento dessas emulsões se processa em um intervalo de tempo de apenas alguns minutos, conforme afirma Soares (2006). ABEDA (2001) recomenda o emprego de emulsões de ruptura rápida em tratamentos superficiais e pinturas de ligação.

As emulsões de ruptura média (RM) contêm uma maior concentração de emulsificante que as emulsões de ruptura rápida, o que lhes confere uma maior estabilidade. Quando usadas com agregados de graduação aberta, a sua maior estabilidade permite que as atividades de mistura e compactação sejam realizadas antes que ocorra a ruptura dessas emulsões (Ferreira, 1980). Seu maior campo de atuação, segundo ABEDA (2001), é na produção de pré-misturado à frio (PMF) e em pinturas de ligação entre camadas asfálticas.

Já as emulsões de ruptura lenta (RL) são de alta estabilidade. Ferreira (1980) explica que materiais de grande superfície específica aceleram o processo de ruptura de uma emulsão, de forma que a aplicação de emulsões tipo RR ou RM a esses materiais pode resultar no rompimento antes da conclusão do processo construtivo. Em casos como este, recomenda-se a utilização de emulsões de ruptura lenta. ABEDA (2001) indica que o maior campo de atuação das RL está na produção de pré-misturado a frio (PMF) denso e em estabilizações de solos.

Ainda sobre a ruptura das emulsões é importante ressaltar que o processo de ruptura pode ser iniciado sem que haja o contato da emulsão com agregado. Nestes casos, a ruptura é dita intrínseca ou prematura. A ruptura intrínseca consiste da fusão irreversível das partículas de asfalto, mesmo sem o contato com o agregado, e pode ser resultado de uma série de fatores. Entre estes fatores, Soares (2006) cita o uso de emulsificantes de má qualidade, quantidade insuficiente de emulsificante, decantação prolongada da emulsão, centrifugação ou agitação prolongada, evaporação parcial da água de dispersão e mistura entre emulsões aniônicas e catiônicas.

Segundo ABEDA (2001) os principais cuidados a serem tomados com o intuito de evitar a ruptura prematura das emulsões são:

1. armazenagem das emulsões em temperaturas indicadas;
2. caso seja necessário o aquecimento da emulsão, realizá-lo de maneira homogênea, com circulação ou agitação do tanque;
3. não utilizar ar comprimido para agitar as emulsões;
4. ao diluir, adicionar sempre água à emulsão e nunca o inverso;

5. não estocar emulsões diluídas;
6. completar as cargas dos caminhões tanques, para evitar que a agitação altere as características da emulsão;
7. recircular as emulsões uma vez por semana, quando da armazenagem por períodos longos;
8. não armazenar emulsões em recipientes ou caminhões que contenham produtos remanescentes incompatíveis.

2.2.4 Classificação, Especificações e Aplicabilidade das Emulsões Asfálticas

Conforme visto no item anterior, as emulsões asfálticas podem ser classificadas com relação à velocidade de ruptura em:

- a) emulsões de ruptura rápida (RR);
- b) emulsões de ruptura média (RM);
- c) emulsões de ruptura lenta (RL).

Também foi visto no item 2.2.3.1 que a carga dos glóbulos de betume é uma outra forma de se classificar uma emulsão, de forma que esta pode ser:

- a) aniônica, caso os glóbulos de asfalto sejam carregados negativamente;
- b) catiônica, se os glóbulos forem recobertos por cargas positivas.

Dependendo da quantidade de cimento asfáltico envolvido na fabricação das emulsões, elas podem se classificar em 1C e 2C, onde a terminologia C indica emulsão do tipo catiônica e os números 1 e 2 estão associados à viscosidade relativa e quantidade de cimento asfáltico empregado na fabricação (ABEDA, 2001). O número 1 indica emulsões de viscosidade menor que as emulsões designadas pelo número 2.

Desta forma, segundo a ABEDA (2001), a classificação das emulsões asfálticas fabricadas no Brasil pode ser resumida aos seguintes tipos (excluindo-se as emulsões modificadas por polímeros):

- a) RR-1C: emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida, com teor de resíduo asfáltico no mínimo de 62% e viscosidade Saybolt Furol a 50°C entre 20 e 90 s (baixa viscosidade) e desemulsibilidade superior a 50%;
- b) RR-2C: emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida, com teor de resíduo asfáltico no mínimo de 67% e viscosidade Saybolt Furol a 50 °C entre 100 e 400 s (alta viscosidade) e desemulsibilidade não inferior a 50%;
- c) RM-1C: emulsão asfáltica catiônica de ruptura média, com teor de resíduo asfáltico no mínimo de 62% e viscosidade Saybolt Furol a 50 °C entre 20 e 200 s, teor de solvente destilado de no máximo 12% e desemulsibilidade inferior a 50%;
- d) RM-2C: emulsão asfáltica catiônica de ruptura média, com teor de resíduo asfáltico no mínimo de 65% e viscosidade Saybolt Furol a 50 °C entre 100 e 400 s, teor de solvente destilado entre 3 e 12% e desemulsibilidade inferior a 50%;
- e) RL-1C: emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta, com teor de resíduo asfáltico no mínimo de 60% e viscosidade Saybolt Furol a 50 °C de no máximo 70 s. Não apresenta solvente em sua constituição. Não se faz o ensaio de desemulsibilidade para caracterizá-la, e sim o teste com cimento ou com fíler silícico, dependendo do agregado mineral que for usado;
- f) LA-1C: emulsão asfáltica catiônica para lama asfáltica, com teor de resíduo asfáltico no mínimo de 58% e viscosidade Saybolt Furol a 25 °C máxima de 100 s, e teor máximo de 2% no ensaio de mistura com cimento;
- g) LA-2C: emulsão asfáltica catiônica para lama asfáltica, com teor de resíduo asfáltico no mínimo de 58% e viscosidade Saybolt Furol a 25°C máxima de 100 s, e não se exige o ensaio de mistura com cimento.

As especificações gerais dessas emulsões asfálticas, bem como as normas técnicas reguladoras de cada ensaio, são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Especificações de emulsões asfálticas catiônicas (ABEDA, 2001).

Características	Método	Tipos de Ruptura				
	ABNT	Rápida		Média		Lenta
		RR-1C	RR-2C	RM-1C	RM-2C	RL-1C
Ensaio sobre a Emulsão						
Viscosidade Saybolt Furol, a 50°C	NBR-14491	20-90	100-400	20-200	100-400	Máx. 70
Sedimentação, % em peso máx	NBR-6570	5	5	5	5	5
Peneiração, 0,84mm, % em peso máx	NBR-14393	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Resistência à água, % mín. de cobertura						
agregado seco	NBR-6300	80	80	60	60	60
agregado úmido		80	80	80	80	80
Mistura com cimento, % Max.	NBR-6297	-	-	-	-	2
ou fíler silfício	NBR-6302	-	-	-	-	1,2 - 2,0
Carga da partícula	NBR-6567	+	+	+	+	+
pH, máx.	NBR-6299	-	-	-	-	6,5
Destilação						
solvente destilado, % em vol	NBR-6568	0-3	0-3	0-12	03-12	nula
resíduo, % em peso mín.		62	67	62	65	60
Desemulsibilidade						
% em peso mín.	NBR-6569	50	50	-	-	-
% em peso max.		-	-	50	50	-
Ensaio sobre o Solvente Destilado						
Destilação, 95% evaporados, °C, máx.	NBR-9619	-	-	360	360	-
Ensaio sobre o resíduo						
Penetração, 25°C, 100g, 5s, 0,1mm	NBR-6576	50-250	50-250	50-250	50-250	50-250
Teor de Betume, % em peso mín.	NBR-14855	97	97	97	97	97
Dutilidade a 25°C, cm, mín	NBR-6293	40	40	40	40	40

Ainda segundo ABEDA (2001), devido à diversidade de produtos emulsificados, é possível a utilização de emulsões em praticamente todas as camadas asfálticas de um pavimento, inclusive em trabalhos de recuperação e manutenção. A Tabela 2.2 indica quais emulsões são recomendadas para cada tipo de serviço em pavimentação.

Tabela 2.2 - Emulsões recomendadas para cada tipo de serviço (adaptada de ABEDA, 2001).

Serviços a Frio	** Emulsões Asfálticas
Capa Selante / Banho Diluído	*RR-1C; *RR-2C; *RL-1C
Pintura de Ligação	*RR-1C; *RR-2C; RM-1C; RM-2C; *RL-1C
Selagem de Fissuras	*RR-1C; *RL-1C
Tratamento Antipó	RR-1C; RR-2C; RL-1C
Macadame Betuminoso	*RR-2C
Tratamentos Superficial por Penetração	*RR-1C; *RR-2C
Areia-Asfalto	*RL-1C
Pré-Misturados	*RM-1C; *RM-2C; *RL-1C
Tapa-Buraco	*RR-1C; RM-1C; RM-2C; *RL-1C
Lama Asfáltica	*RL-1C; *LA-1C; *LA-2C; *LA-E
Estabilização Solo-Emulsão	RL-1C; LA-1C; LA-2C; LA-E
Microrrevestimento Asfáltico	Emulsão Asfáltica com Polímero

* Dependendo do projeto e das especificações de serviço, podem ser modificadas por polímeros.

** Geralmente Empregadas.

Dentre as várias aplicabilidades das emulsões asfálticas em serviços de pavimentação, encontra-se a estabilização de solos, que é o objeto de pesquisa deste trabalho. Passa-se a descrever a seguir os processos envolvidos na estabilização de solos e as peculiaridades inerentes à estabilização por meio da aplicação de materiais betuminosos ao solo.

2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

O solo é o material de construção de maior aplicabilidade e maior abundância no mundo. Contudo, as mais diversas utilizações de solos em engenharia requerem o atendimento de critérios técnicos rigorosos, o que restringe a utilização de jazidas de qualidade tecnológica inferior. A qualidade requerida nos projetos nem sempre é alcançada pelas jazidas ocorrentes nas proximidades das obras, sendo necessário, muitas vezes, transportar material de jazidas mais distantes que apresentem as características solicitadas para o atendimento dos critérios técnicos de um empreendimento.

Esse transporte de materiais, muitas vezes, representa um acréscimo de custos para o orçamento, o que pode restringir o atendimento de outro critério de importância para engenharia: o econômico. Os custos envolvidos com a aquisição, escavação e transporte de materiais distantes dos canteiros pode inviabilizar economicamente a construção de um empreendimento.

Neste contexto, tem-se procurado modificar as propriedades dos materiais lindeiros às obras, a partir de intervenções mecânicas ou aplicação de certos aditivos aos solos, buscando uma solução que viabilize o atendimento de critérios técnicos e econômicos. Este processo é conhecido como estabilização de solos.

Embora a estabilização de solos seja aplicável como solução a quase todo tipo de problema geotécnico, Araújo *et al.* (1983) apontam a construção de estradas e aeroportos como o tipo de obra com a maior aplicabilidade da técnica. Estes autores afirmam que o fato se deve às extensas áreas envolvidas em trabalhos de pavimentação, o que facilmente justificam, economicamente, as despesas com melhoramento de solos locais em substituição aos custos gerados pela aquisição, escavação e transporte de materiais mais distantes do local da obra.

2.3.1 Definição

A estabilização do solo, em seu sentido mais amplo, pode ser compreendida como a alteração de qualquer propriedade do mesmo, que melhore o seu comportamento sobre o ponto de vista de aplicação à engenharia (Villibor, 1982).

De uma maneira mais particular, o processo de estabilização consiste da aplicação de um fator estabilizante ao solo, visando modificar as suas propriedades, tornando-o capaz de atender satisfatoriamente a uma dada necessidade prevista em projeto. O fator estabilizante pode ser um aditivo químico, um material granular ou até mesmo a aplicação de uma energia dinâmica.

Normalmente, as propriedades de um solo que se pretende melhorar a fim de possibilitar seu uso em obras de engenharia são a expansibilidade, a resistência mecânica, a durabilidade e a permeabilidade.

As alterações nas propriedades de um solo podem ser de ordem física ou de ordem química. Para melhor entendimento, os métodos de estabilização podem ser divididos em dois grupos: estabilização mecânica, quando ocorrem alterações de ordem física no solo, e estabilização química, quando as modificações resultam da interação química entre as partículas de solo e um agente estabilizante.

Para a escolha do processo de estabilização a ser empregado, deve-se ter em mente que estabilização não é um processo infalível pelo qual todas as propriedades dos solos são melhoradas simultaneamente. Para uma escolha adequada do método de estabilização a ser utilizado é importante focar as propriedades de solo que precisam ser corrigidas e os propósitos aos quais se destinam o processo de estabilização. O comportamento de cada agente estabilizante é único, tendo aplicabilidades e limitações particulares (Ingles e Metcalf, 1972 e Yoder e Witczak, 1975). A Tabela 2.3 apresenta os efeitos da aplicação de diferentes agentes estabilizantes a alguns tipos de solo.

Tabela 2.3 - Efeitos dos diferentes tipos de estabilização sobre alguns tipos de solo (adaptado de Ingles e Metcalf, 1972).

Predominância no Solo	Estabilizante Recomendado	Efeito
Areia	Argila	Estabilidade Mecânica
	Cimento	Maior Densidade e Coesão
	Betume	Maior Coesão
Caulinita	Areia	Estabilidade Mecânica
	Cimento	Resistência a Curto Prazo
	Cal	Trabalhabilidade e Resistência a Longo Prazo
Ilita	Cimento	Resistência a Curto Prazo
	Cal	Trabalhabilidade e Resistência a Longo Prazo
Montmorilonita	Cal	Trabalhabilidade e Resistência a Longo Prazo

Apresentam-se a seguir os principais tipos de estabilização e seus respectivos mecanismos.

2.3.2 Estabilização Mecânica

São considerados métodos de estabilização mecânica os procedimentos que mudem apenas o arranjo das partículas do solo ou a sua granulometria. Sobressaem-se a compactação e a correção granulométrica.

2.3.2.1 Compactação

O processo de compactação é entendido como a densificação de solos devido à expulsão de ar e do rearranjo das partículas, por meio da aplicação de uma energia mecânica. Segundo Das (2007) e Pinto (2006) esse procedimento traz como benefícios em termos de propriedades geotécnicas, o aumento da densidade, da resistência ao cisalhamento e da capacidade de suporte, além de reduzir a permeabilidade, a contração e a compressibilidade dos solos.

Alguns pesquisadores como Villibor (1982) não consideram a compactação, por si só, como um tipo de estabilização, mas sim como parte integrante de qualquer processo de estabilização, sendo sempre executada após a mistura com o agente estabilizante.

2.3.2.2 Estabilização granulométrica

A estabilização granulométrica consiste na combinação e manipulação de solos, em proporção adequada, de forma a se obter um produto final de estabilidade maior que os solos de origem, e adequado para a aplicação em cada caso particular (Villibor, 1982).

Ainda segundo Villibor (1982), os fatores que influem no comportamento das composições granulométricas são a natureza das partículas, que devem ser resistentes aos esforços, e a estabilização da composição.

O princípio da estabilização granulométrica consiste da composição de solos, ou solos e agregados, de forma que resulte em uma mistura na qual a resistência seja garantida pelo contato grão a grão das partículas maiores, ao mesmo tempo em que os vazios entre essas partículas sejam ocupados por um material mais fino, a fim de garantir uma maior densidade e uma menor permeabilidade. Desta forma, a composição granulométrica ideal é ilustrada pelo item b da Figura 2.10.

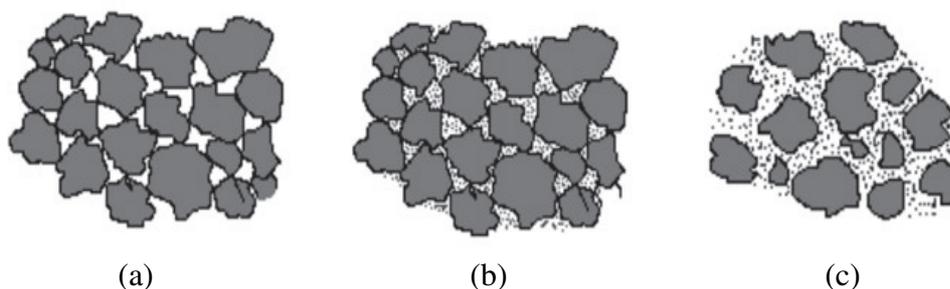


Figura 2.10 - Tipos de composições granulométricas (Yoder e Witzak, 1975).

2.3.3 Estabilização Química

O processo de estabilização química consiste do uso de agentes estabilizantes que reagem com as partículas do solo, modificando suas propriedades físicas, o que resulta no melhoramento e estabilidade das suas propriedades mecânicas e hidráulicas. Neste tipo de estabilização podem ser usados diversos tipos de aditivos, ocorrendo reações químicas entre o solo e estes. As partículas do solo são geralmente aglutinadas pelo aditivo, que pode ser o cimento, a cal, produtos betuminosos, polímeros, entre outros.

Os aditivos químicos mais tradicionalmente empregados em estabilização são o cimento Portland, a cal e os materiais betuminosos. Descreve-se resumidamente a seguir as técnicas solo-cimento e solo-cal. A técnica solo-betume, sendo objeto de pesquisa dessa trabalho, é estudada mais detalhadamente no item 2.4.

2.3.3.1 *Solo-Cimento*

A técnica de solo-cimento consiste na escarificação do solo, adição do cimento Portland à superfície da camada de solo solto, mistura do solo com o cimento pulverizado, adição de água e compactação da mistura. Com a hidratação do cimento, a mistura será estabilizada, resultando em um material de maior resistência mecânica e menos susceptível à água (Ingles e Metcalf, 1972).

Segundo Yoder e Witczak (1975) os fatores que influenciam as propriedades físicas das misturas solo-cimento são o tipo de solo, o teor de cimento aplicado, o grau da mistura, o tempo de cura e a densidade da mistura compactada. Completam ainda que o fator mais importante a ser considerado é o tempo de cura, sendo essencial que as misturas sejam curadas na presença de água antes da liberação do pavimento ao tráfego.

A técnica pode ser aplicada a vários tipos de solo, exceto solos excessivamente orgânicos.

Segundo Ingles e Metcalf (1972) a adição de teores crescentes de cimento aos solos é responsável por um crescimento na resistência, na capacidade de suporte, na susceptibilidade de ciclos de molhagem e secagem, e por uma redução na permeabilidade. Por outro lado, a adição de teores muito altos de cimento podem acarretar em trincas por retração. Desta forma, torna-se importante a determinação do teor ótimo de cimento a ser adicionado ao solo.

O método de dosagem das misturas solo-cimento, estabelecido pela NBR 12253, consiste na escolha do menor teor de cimento com o qual a mistura, após cura de 7 dias, atinge uma resistência à compressão simples igual ou superior a 2,1 MPa. Destaque-se que esse método de dosagem restringe-se aos solos que se enquadram nas classes TRB A1, A2, A3 e A4, e que contenham 100% do material passando na peneira de abertura 76 mm, e no máximo 45% de material retido na peneira de abertura 4,8 mm.

“Há um método alternativo para estimar este valor de estabilização com o cimento que é chamado método físico-químico, desenvolvido pelo professor Francisco Casanova. Consiste em se verificar, dentro de provetas padronizadas qual é o teor de cimento que conduz à maior variação de volume em relação ao solo puro” (Miceli Jr, 2006).

2.3.3.2 *Solo-Cal*

A estabilização de solos com cal é bastante similar à estabilização com cimento, no que se refere à avaliação de desempenho e aos métodos construtivos. No entanto, ao contrário das misturas solo-cimento, a estabilização com cal não é recomendada para solos granulares, sendo indicada para solos pesados e argilosos (Ingles e Metcalf, 1972).

Cumprе salientar que a principal diferença entre as misturas solo-cimento e solo-cal consiste na velocidade de aumento de resistência observada nos dois processos: nas misturas solo-cimento a resistência cresce bastante em curto espaço de tempo, enquanto nas misturas solo-cal, os resultados são distribuídos ao longo do tempo de cura. Além disso, como as reações nas misturas solo-cal não se processam de forma tão imediata como nas misturas solo-cimento, os atrasos no processo de compactação são menos preocupantes para o processo de estabilização com cal que para os processos que utilizam o cimento como estabilizante.

Segundo Yoder e Witczak (1975) a adição de cal aos solos geralmente resulta em uma diminuição na densidade do solo, em mudanças nas suas propriedades plásticas e no aumento de sua resistência, sendo essas mudanças os resultados de várias reações. A primeira destas reações consiste da alteração no filme de água que circunda as moléculas dos argilo-minerais. Em seguida, ocorre a floculação das partículas de solo, para que, por último, ocorram as reações pozolânicas. Essas reações pozolânicas consistem da reação da cal com componentes do solo (sílica e alumina, principalmente), resultando em grandes incrementos de resistência.

Os fatores que influenciam o comportamento das misturas solo-cal são: o teor de cal, o tipo de cal, o tipo de solo, o tempo de cura e a temperatura. Os efeitos da temperatura no comportamento das misturas é mais acentuado na técnica solo-cal que nas misturas solo-cimento. Com o aumento da temperatura, as misturas solo-cal

experimentam um rápido ganho de resistência. Ingles e Metcalf (1972) atribuem a essa característica o sucesso da utilização das misturas solo-cal em locais de clima quente.

O método de dosagem das misturas solo-cal consiste da adição de teores variáveis de cal à amostra de solo, e da observação dos seus efeitos na plasticidade, coesão e resistência das misturas, após um determinado período de cura. O teor que proporcionar o melhor comportamento da mistura é apontado como teor ótimo. Ingles e Metcalf (1972) aconselham, como ponto de partida para a dosagem, a utilização de 1% de cal para cada 10% de argila contida no solo. Indicam ainda que para uma determinação mais exata, deve-se também verificar as variações de 2% de cal para mais e para menos do teor testado.

2.4 ESTABILIZAÇÃO BETUMINOSA

De uma forma geral, dá-se o nome de estabilização betuminosa aos métodos de construção em que um material betuminoso é adicionado a um solo, ou mistura de solos, visando a melhoria de suas características (Senço, 2001).

A estabilização betuminosa de solos não é uma técnica recente. Comenta-se que as primeiras experiências da aplicação de materiais asfálticos visando melhorar o desempenho de estradas de terra foram realizadas no início do século XX.

No item a seguir é realizado um levantamento sobre o estado da arte da técnica de estabilização de solos com materiais asfálticos.

2.4.1 Desenvolvimento Histórico da Estabilização Betuminosa

Ferreira (1980) relata que a estabilização betuminosa de solos começou a ser empregada quando engenheiros rodoviários, trabalhando nas proximidades de campos petrolíferos, notaram que ao espalharem óleo cru sobre as estradas de terra conseguiram reduzir o pó existente, tornando-as mais aptas a resistirem aos rigores do tráfego e do intemperismo. Essa prática começou a ser difundida, e com o aprimoramento da técnica, houve a substituição do óleo cru pelo petróleo destilado.

No intuito de diminuir o grau de dificuldade do processo de fluidificação do asfalto, foi desenvolvido no início do século XX um processo de diluição dos asfaltos de petróleo pela incorporação de solventes, constituídos exclusivamente por derivados

mais leves e voláteis do petróleo. Desta forma, nasceram os denominados “cut-backs”, conhecidos no Brasil como asfaltos “diluídos” (ADP – asfalto diluído do petróleo) (Castro, 2003).

Ainda segundo Ferreira (1980) os asfaltos diluídos de cura rápida e média foram então utilizados como matéria-prima nas estabilizações betuminosas até que se observou que este tipo de material apresentava difícil distribuição em determinados tipos de solos. Houve então a substituição dos asfaltos diluídos pelas emulsões asfálticas.

No final da década de 30, devido à iminência da Segunda Guerra Mundial, um grande interesse foi mostrado pelo potencial das estabilizações solo-betume como um método rápido para a construção de aeroportos e pavimentos rodoviários. Também durante os anos de guerra, foram desenvolvidos muitos métodos de estabilização, sendo encontradas contradições entre os resultados obtidos, basicamente devido a um entendimento inadequado das variáveis envolvidas (Ferreira, 1980).

Em consulta aos anais do TRB (Transportation Research Board), foram encontrados os resumos de alguns trabalhos desenvolvidos nesta época, destacando-se Weathers (1937), Muir, Hughes e Browning (1938) e Endersby, Krynine e Holmes (1942). Em 1937, Weathers publicou o trabalho intitulado Sand Bituminous Stabilization (estabilização betuminosa de areias) que tratava de 314 milhas (505 km) de rodovias no estado da Flórida/ Estados Unidos, que foram construídas a partir da adição de asfaltos diluídos a materiais locais e que apresentaram comportamento satisfatório com baixíssimos custos de manutenção. Por outro lado, Muir, Hughes e Browning (1938) publicaram o trabalho Bituminous Stabilization Practices in the United States (Práticas de Estabilização Betuminosa nos Estados Unidos) cujas principais conclusões foram que as bases de solo-betume deveriam ser tratadas superficialmente devido à sua fragilidade em resistir ao tráfego, e que a drenagem é uma prioridade máxima para o uso adequado da técnica.

Numa primeira tentativa de entender corretamente as variáveis envolvidas, ainda no período da guerra, Endersby, Krynine e Holmes (1942) publicaram a pesquisa Fundamental Research in Bituminous Soil Stabilization (Pesquisa Fundamental em Estabilização Betuminosa de Solos), na qual descreveram as misturas solo-betume como um sistema solo-óleo-água cujo agente coesivo é a argila.

Ferreira (1980) comenta que, durante a guerra, e imediatamente após o seu término, foram realizadas algumas pesquisas de estabilização betuminosa utilizando cal como aditivo. Entretanto, o desenvolvimento dessas pesquisas foi bastante limitado.

Entre o final da guerra e o início dos anos 50 houve pouco desenvolvimento das investigações em solo-betume. Em 1951, o Road Research Laboratory da Inglaterra, publicou o livro *Soil Mechanics for Road Engineer* (Mecânica dos Solos para Engenheiros Rodoviários). Esta obra contém um capítulo didático sobre estabilização de solos com materiais betuminosos, onde é abordada a influência que a aplicação da emulsão exerce sobre a resistência, a curva de compactação e a adsorção de uma amostra de solo genérica, além dos métodos de ensaios e os métodos construtivos aplicados à época. As principais recomendações tecidas pelos autores são de que a estabilização betuminosa de solos é mais aplicável em regiões de clima seco e que a determinação do teor ótimo de ligante depende do tipo de melhoramento que se pretende aplicar ao solo.

Guarçoni *et al.* (1988) comentam que, no final dos anos 50 e início dos anos 60, a Divisão de Pesquisas Tecnológicas do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER) desenvolveu, no Serviço de Química e Betume, estudos de estabilização de solos utilizando asfaltos diluídos, visto que, na época, a produção de emulsão betuminosa no Brasil era muito limitada. Eram, no entanto, estudos que não obedeciam a qualquer plano de pesquisa, motivo pelo qual não chegaram a fornecer qualquer subsídio que permitisse ao DNER estabelecer, ainda que provisoriamente, especificações e normas para as misturas solo-betume.

A aplicação efetiva de solo-betume em pavimentação no Brasil teve início depois de 1966. Neste ano, Santana (1976), ao colher elementos para cadastro de rodovias pavimentadas no Ceará, Piauí e Maranhão se deparou com 7 km contínuos de tratamento contra-pó em estradas de terra que se apresentava em ótimo estado sem ter sofrido nenhum processo de manutenção. Esse tratamento consistia numa imprimação de 3mm de penetração e de uma capa selante. Este autor acreditou que se conseguisse penetrações de imprimação mais profundas obteria boa durabilidade dos pavimentos.

Visando garantir uma maior penetração da imprimação nas camadas granulares, Santana (1976) realizou uma experiência que consistiu na escarificação de 4 a 6 cm do

revestimento primário, incorporação de emulsão de ruptura lenta, mistura, cura e compactação. Alguns trechos experimentais foram realizados com muito sucesso, para que, em seguida, a técnica fosse utilizada em grande escala (cerca de 200 km entre 1974 e 1976, nos estados do Piauí e Maranhão). Após o sucesso desta experiência, Santana (1976) propôs uma nova adaptação da técnica, visando à economia no consumo de emulsão asfáltica. Essa adaptação consistiu da distribuição da emulsão em um gradiente decrescente com a profundidade, de forma que a concentração de emulsão no topo fosse maior que no restante da camada. O procedimento adotado para a construção dessa nova estabilização consistiu dos seguintes passos:

1. após escarificado e destorroado, o material foi dividido em duas leiras, entre as quais foi lançada a primeira aplicação do ligante (um terço do teor total de emulsão), conforme ilustrado na Figura 2.11;

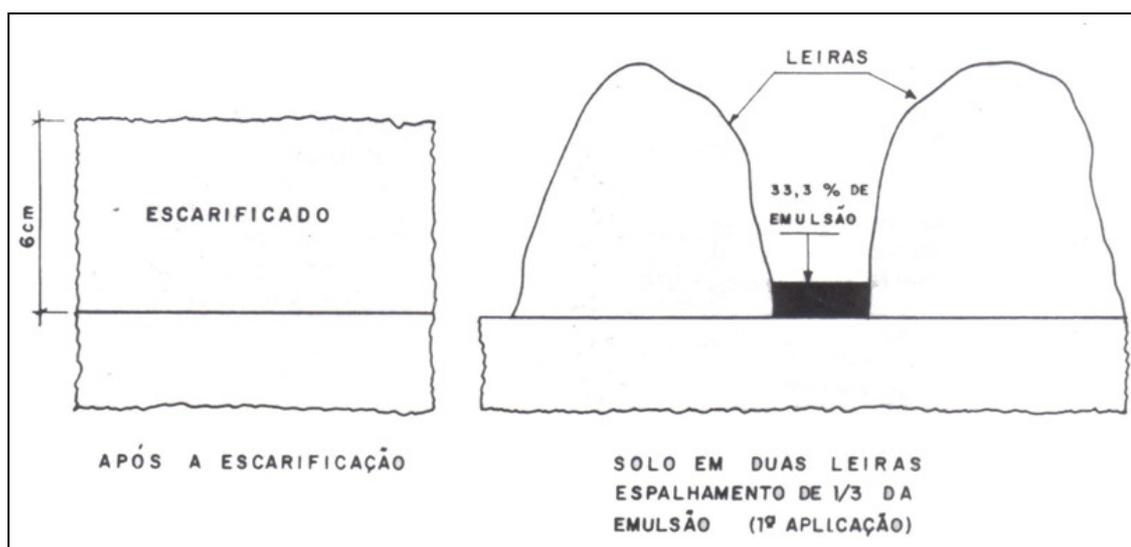


Figura 2.11 - Esquema para a aplicação do primeiro terço de emulsão, na distribuição em gradiente (Santana, 1976).

2. após a mistura, o material foi dividido em três partes iguais, sendo uma delas espalhada na pista e as outras duas em leiras (ver Figura 2.11), ficando cada uma das partes com $1/9$ (11,1%) do teor total de ligante;
3. aplicou-se mais $1/3$ do total do ligante, entre as leiras, sobre a primeira camada espalhada na pista, conforme a Figura 2.12;

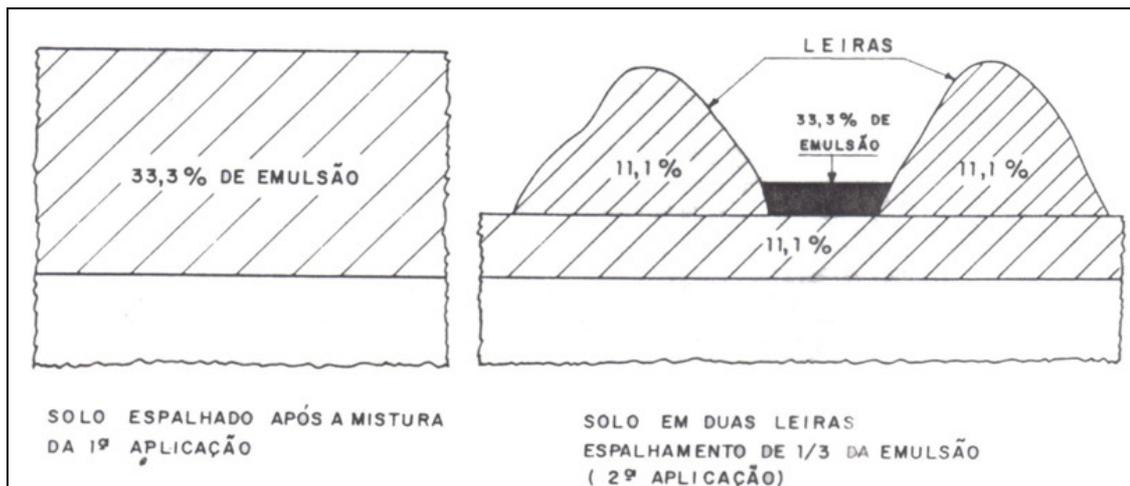


Figura 2.12 - Esquema para a aplicação do segundo terço de emulsão, na distribuição em gradiente (Santana, 1976).

4. após a mistura, o material das leiras foi dividido em duas partes. Uma parte foi compactada na pista, sobre a primeira camada previamente compactada, e outra parte foi dividida em duas leiras (ver Figura 2.13);

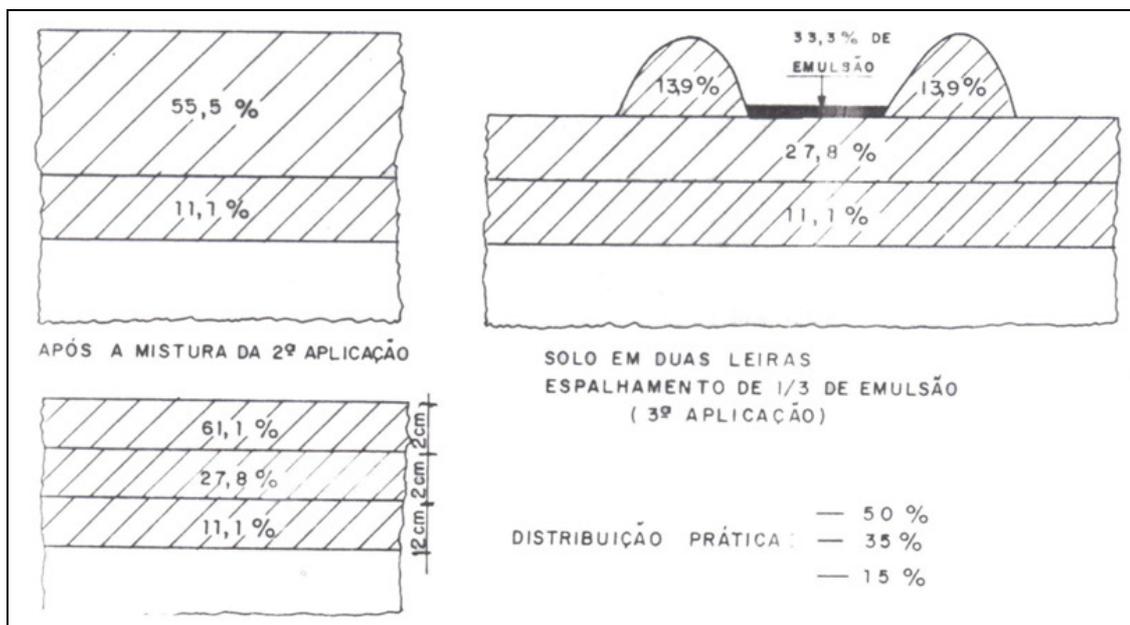


Figura 2.13 - Esquema para a aplicação da terceira parte da emulsão, na distribuição em gradiente e aspecto final da camada (Santana, 1976).

5. aplicou-se, entre as duas leiras, a terceira parte do ligante;
6. foi realizada então, a mistura da terceira parte de ligante às leiras;

7. em seguida, o material foi cuidadosamente retirado da pista, formando 3 leiras correspondendo respectivamente às 3 camadas – superior, intermediária e inferior – para que fossem submetidos à cura;
8. após a cura, as leiras foram espalhadas na ordem indicada, formando uma camada solta que após a compactação apresentasse 6 cm de espessura.

Em entrevista realizada em novembro de 2007 com o Engenheiro Francisco Baima Barbosa, do estado do Ceará, um dos engenheiros que trabalhou na mesma equipe que o Engenheiro Humberto Santana durante a década de 70 e metade da década de 80, foi revelado que esta equipe realizou obras de pavimentação com solo-emulsão em mais de 2000 km, nos estados do Rio de Janeiro, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí, Maranhão e Pará.

Ao contrário do que era apresentado na literatura, foi visto por essa equipe que o comportamento das misturas de solo argiloso com emulsão apresentava resultados melhores que as misturas de solo arenoso com emulsão. Essa observação foi ainda enaltecida pelo entrevistado quando relatou um trecho construído no Piauí pelo DNER (hoje DNIT) com um solo argiloso e lama asfáltica que após 12 anos sujeito ao tráfego, e sem receber manutenção, apresentava ainda bom desempenho.

O entrevistado relatou ainda que todo o processo construtivo foi conduzido pelo conhecimento empírico dos técnicos envolvidos, uma vez que se tentou avaliar em laboratório o melhoramento do material por meio do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), mas que nenhuma conclusão pôde ser observada. A adição de emulsão asfáltica aumentava o ISC de algumas amostras de solo, ao passo que reduzia o ISC de outras, não sendo encontrada nenhuma correlação entre as características físicas dos solos e os resultados dos ensaios.

Desta forma, a técnica solo-emulsão permaneceu pautada no empirismo dos técnicos responsáveis, não havendo o desenvolvimento de estudos que subsidiassem o estabelecimento de normas de dosagem, de dimensionamento ou de avaliação de desempenho das misturas solo-emulsão.

Ferreira (1980) confirmou que à data do início de sua pesquisa (final da década de 70), havia muitos exemplos de sistemas solo-emulsão na construção de pavimentos

flexíveis, mas ainda não existia uma metodologia aceita para a avaliação e o dimensionamento desses sistemas. Essa foi a motivação da execução de várias pesquisas da Universidade Federal da Paraíba em solo-emulsão com solos da Paraíba, Maranhão e Piauí.

Durante a década de 80 e início da década de 90, algumas pesquisas científicas foram desenvolvidas com o intuito de mensurar as melhorias provocadas nos solos a partir da adição de emulsão asfáltica. Dentre as pesquisas mais importantes citam-se Momm (1983), Araújo *et al.* (1983), Guarçoni *et al.* (1988), Mattos *et al.* (1991), Bueno *et al.* (1991), Carvalho *et al.* (1992), sendo os ensaios de compactação, resistência à compressão simples e ISC os parâmetros mais utilizados para a análise.

Nos últimos dois anos um enfoque diferente vem sendo dado aos estudos de solo-emulsão. Pesquisas como as de Miceli Jr (2006) e Soliz (2007) lançaram mão da análise mecanística para a avaliação da técnica solo-emulsão, onde a análise é baseada principalmente em ensaios triaxiais dinâmicos e resistência à compressão simples. Essas pesquisas apresentaram ainda uma tentativa em avaliar o desempenho de misturas solo-emulsão quando submetidas diretamente ao tráfego, por meio de análises de desgaste, medidos em ensaios de LWT e WTAT adaptados para a aplicação em solos.

Nos itens que se seguem são abordados os mecanismos da estabilização betuminosa e as variáveis que influenciam a qualidade das misturas solo-emulsão, observados nos diversos trabalhos estudados durante a realização desta revisão bibliográfica.

2.4.2 Mecanismos da Estabilização Betuminosa

A busca pelo entendimento das variáveis que interferem no desempenho das misturas de solo-emulsão vem sendo almejada desde que se utilizou esta técnica pela primeira vez. É consenso entre os diversos autores que o mecanismo de estabilização com materiais betuminosos consiste em aumentar a coesão e reduzir a penetração da água pela presença de um filme de betume.

Ingles e Metclaf (1972) afirmam que a impermeabilização pode ocorrer através da criação de uma capa na superfície das partículas ou por meio do preenchimento dos vazios do solo. Dizem ainda que, o aumento de resistência se dá com aumento de

coesão, que por sua vez se deve à presença de filme contínuo de betume sobre as partículas do solo. No entanto, esses dois efeitos se contrapõem, uma vez que quanto mais finos forem os filmes de betume, mais resistente será a mistura, e quanto mais espessos forem esses filmes, mais efetiva será a prevenção da absorção de água. Muito betume, entretanto, lubrifica as partículas de solo e evita o entrosamento dos grãos, causando perda de resistência na mistura. A Figura 2.14 ilustra o filme betuminoso recobrendo as partículas de solo.

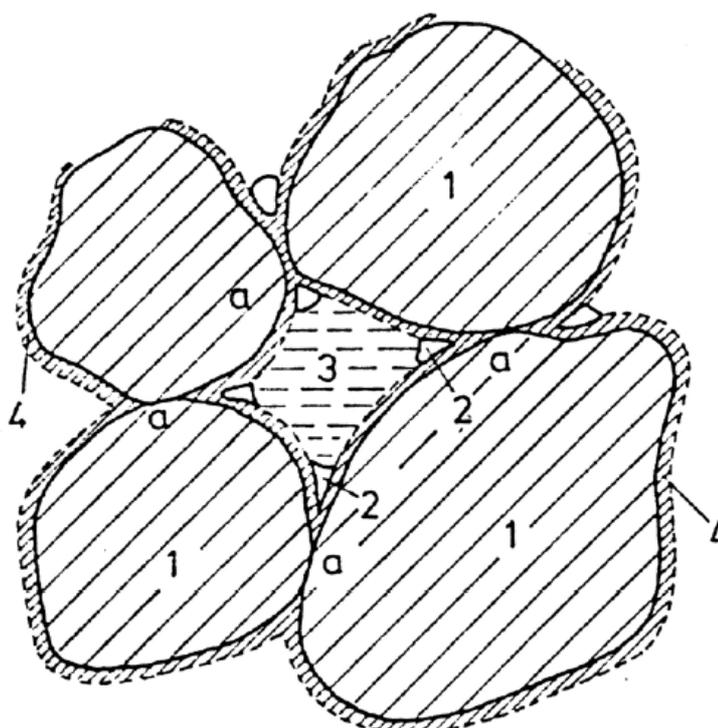


Figura 2.14 - Filme betuminoso encobrendo as partículas de solo. 1- partícula de solo, 2- vazios, 3-água, 4-filme betuminoso, a-contato entre grãos (Kezdi, 1979 *apud* Miceli Jr, 2006).

Os processos físico-químicos envolvidos na formação do filme betuminoso são explicados por Guarçoni *et al.* (1988). Descreve-se a seguir a explicação desses autores.

O sistema solo-emulsão-água pode ser considerado como um sistema fechado, heterogêneo, constituído por três fases e quatro componentes: solo, betume, água e fase aquosa da emulsão (água e solutos tenso-ativo). Das três fases, uma é contínua e duas são descontínuas. São descontínuas as fases constituídas pelo solo e pelos glóbulos de betume, já a fase contínua é constituída pela solução aquosa obtida pela adição de água à fase dispersante da emulsão. Esse sistema solo-emulsão-água apresenta interfaces bem definidas, a saber:

1. solo-solução aquosa
2. solo-betume
3. betume-solução aquosa

Considerando a primeira interface (solo-solução aquosa), tem-se um subsistema composto por uma substância adsorvente (solo) e uma substância com características de adsorvato (solução aquosa). Ao entrarem em contato, o solo adsorve parte do soluto tenso-ativo, diminuindo a concentração de soluto na fase aquosa, o que resulta em um desequilíbrio na emulsão. Com esse desequilíbrio, inicia-se o processo de ruptura da emulsão, e a conseqüente coalescência das partículas betuminosas, conforme explicado no item 2.2.3.2, resultando na formação do filme betuminoso sobre as partículas de solo.

A quantidade de soluto adsorvido é função da sua concentração na solução. Desta forma, quanto mais diluída estiver a emulsão, haverá menor adsorção de soluto, e a ruptura da emulsão ocorrerá mais lentamente, possibilitando assim uma melhor mistura.

Com o intuito de provar que o envolvimento de todos os grãos do solo pelo ligante betuminoso é impossível de ocorrer, Guarçoni *et al.* (1988) fizeram as seguintes simplificações: admitiu-se que foi mantido o equilíbrio entre a emulsão betuminosa e o solo umedecido, e que a espessura mínima de recobrimento da partícula de solo é igual à espessura mínima do ligante (considerando o valor de 3 μm para os glóbulos de betume da emulsão). Por meio da fórmula de Duriez (ver equação 2.1) obtém-se um diâmetro mínimo de 0,075 mm, ou seja, a fração de solo passante na peneira número 200 não pode ser envolvida pelo ligante da emulsão.

$$e \approx \frac{d^{0,8}}{40} \quad (2.1)$$

Onde e é espessura do ligante e d é diâmetro médio do grão.

Guarçoni *et al.* (1988) equipararam um grão de solo a um cubo de aresta “a” e usando a equação 2.2, obtiveram para uma determinada granulometria de solo fino uma taxa de ligante de 9,7% para que todos os grãos de solo possam ser envolvidos pelo ligante de uma emulsão:

$$\%l = \frac{V_l}{V_s} \times \frac{D_l}{D_s} \times 100 \quad (2.2)$$

Onde:

%l: percentagem de ligante em peso;

V_l : volume de ligante;

V_s : volume de solo;

D_s : Densidade real de solo;

D_l : Densidade de ligante.

Em termos de adição de emulsão (resíduo de 65 % de betume) seria necessário uma taxa de emulsão de 13,4 %, valor que pode ser considerado inviável na maior parte dos casos. Vê-se portanto que, o recobrimento de todos os grãos de maneira uniforme é inexequível para solos finos e economicamente inviável para solos granulares.

‘Não deve ser esquecido que estes valores foram calculados admitindo-se a estabilidade da emulsão em contato com os grãos do solo, o que não ocorre. Na realidade, o que ocorre é a ruptura da emulsão com a coalescência de várias partículas de ligante, formando aglomerados betuminosos de volumes diversos, espalhados pela massa de solo.’

‘Este sistema criado pela mistura solo-emulsão-água, se compactado, dará origem a um outro, formado por uma estrutura de grãos de solo com adsorção superficial do soluto e ainda com grumos formados por ligante betuminoso, funcionando como rótulas. Essas rótulas diminuem o número de contatos grão-grão, o que irá diminuir a resistência do conjunto aos esforços cisalhantes. Por outro lado, esses grumos funcionam também como obstruções na rede de capilares criada pela estrutura de grãos de solo formada após compactação.’

‘Se, no entanto, o sistema obtido por mistura e compactação, for submetido ao processo de perda de umidade a níveis bem baixos e levando novamente o sistema a reabsorver água até a saturação, verifica-se que a quantidade de água adsorvida será

realmente menor que a adsorvida pelo mesmo solo compactado sem mistura com emulsão” (Guarçoni *et al.*, 1988; Mattos, 1991)

Mattos (1991) concluiu que a ação hidrófuga que foi criada pela adsorção de soluto tenso-ativo no solo e pela obstrução dos capilares aumenta a resistência do sistema quando o ensaio ocorrer sob condições de saturação. Enquanto o sistema multi-rotulado, por sua vez, tenderá a diminuir a resistência do solo.

Miceli Jr (2006), baseado nos resultados de Bueno *et al.* (1991), faz uma ressalva nas conclusões de Mattos (1991). Ele comenta que se a perda de umidade se der de forma rápida ou abrupta, como é o caso de secagem em estufa, a ação hidrófuga descrita não é observada.

Kézdi (1979) *apud* Miceli Jr (2006) explica que, essa ação hidrófuga na mistura deve-se principalmente às diferenças entre as forças de adesão e as fases envolvidas do sistema: ar, água, emulsão e solo. Essas forças são representadas na Figura 2.15.

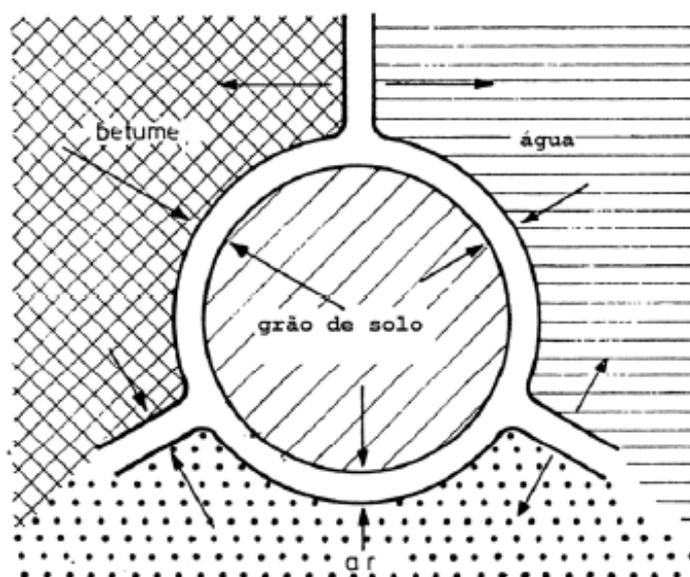


Figura 2.15 - Forças de adesão atuantes entre as fases do sistema solo-água-emulsão (Kézdi, 1979 *apud* Miceli Jr, 2006)

Sobre este modelo tríplice solo-água-emulsão, Kézdi (1979), citado por Miceli Jr (2006), afirma que deve existir um ponto ótimo, onde a mistura pode ser feita com uma quantidade ótima de emulsão que proporcione um máximo de resistência ao cisalhamento e de uma maneira mais eficiente.

2.4.3 Variáveis que Influenciam a Estabilização Betuminosa

Muitas são as variáveis que interferem na qualidade das misturas solo-emulsão. A qualidade e quantidade de cada elemento formador da mistura e processos empregados na execução exercem grande influência. Entre os fatores intervenientes citam-se o tipo de solo, o tipo de emulsão, o teor ótimo da mistura, o tempo de aeração e o tempo de cura. Descreve-se a seguir cada um desses fatores.

2.4.3.1 *Tipo de Solo*

A grande maioria dos pesquisadores concorda com a superioridade dos solos granulares no processo de estabilização de solos com betume. Vários requisitos foram arbitrados pelos pesquisadores, com o intuito de enquadrar os diferentes tipos de solos quanto à sua potencialidade para estabilização betuminosa. Geralmente, esses requisitos referem-se aos limites de plasticidade máximos e granulometria.

O Transportation Research Board (TRB) *apud* Road Research Laboratory (1951) sugere que os solos a serem estabilizados com betume obedeçam aos limites fornecidos na seguinte relação:

- a) diâmetro máximo do material não maior que aproximadamente um terço (1/3) da espessura compactada da camada do solo tratada;
- b) o percentual passante na peneira de 4,76 mm deve ser maior que 50%;
- c) o percentual passante na peneira de 0,42 mm deve encontrar-se no intervalo de 35% a 100%;
- d) o percentual passante na peneira nº 200 deve encontrar-se no intervalo de 10% e 50%;
- e) o limite de liquidez não deve exceder a 40% e o índice de plasticidade deve ser menor do que 18%.

Ingles e Metcalf (1972) indicam os mesmos limites preconizados pelo TRB para materiais a serem estabilizados com emulsão. Entretanto, comentam sobre a existência de algumas argilas que foram estabilizadas satisfatoriamente tanto com emulsões asfálticas quanto com asfaltos diluídos. Eles citam inclusive a experiência em alguns

solos que apresentavam mais de 75% passante na peneira nº 200 e limite de liquidez acima de 50% que foram tratados com betume e apresentaram bom desempenho. Estes autores comentam ainda que areias puras tendem a apresentar uma fraca adesão entre a superfície da sílica e o betume, o que pode causar o desligamento do filme betuminoso quando a mistura for submetida à ação da água.

Yoder e Witczak (1979) afirmam que, enquanto a estabilização de solos granulares e pedregulhosos, tanto com asfaltos diluídos como com emulsões asfálticas, é bastante satisfatória, a estabilização betuminosa de solos plásticos é normalmente limitada pelas dificuldades nos processos de mistura e construção. Para esses autores os solos finos, solos arenosos e as areias pedregulhosas apresentaram diferentes limites para adequação da utilização da técnica solo-betume. Esses limites estão apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Critérios recomendados por Yoder e Witczak (1972) para solos a serem estabilizados com betume.

Tipo de Solo	LL/LP	% passante nº200
Areias	IP máximo de 12%	25 % máximo
Pedregulhos e Areia Pedregulhosas	IP máximo de 12%	15 % máximo
Solos Finos	IP máximo de 18% LL máximo de 40%	35 % máximo

No Brasil, apenas um órgão estabeleceu limites para os solos a serem estabilizados com materiais betuminosos: o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP). O DER-SP (1991) estabelece as seguintes exigências para os solos destinados à preparação de solo-asfalto:

- a) a granulometria do solo deve se enquadrar na faixa descrita na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Faixa granulométrica para o solo para estabilização betuminosa (DER-SP, 1991).

Peneira	% passante, em peso
25 mm	80 a 100
4,8 mm	50 a 100
2,0 mm	35 a 100
0,42 mm	15 a 75
0,075 mm	0 a 35

- b) limite de liquidez menor que 30%;

- c) índice de plasticidade menor que 6%;
- d) substâncias nocivas e impurezas inferiores a 5% em peso;
- e) o solo deverá ser isento de matéria orgânica e fragmentos facilmente alteráveis pelo intemperismo.

Apresenta-se a seguir, na Tabela 2.6, um quadro resumo dos requisitos dos solos a serem estabilizados com materiais betuminosos segundo os diversos autores.

Tabela 2.6 - Quadro resumo dos requisitos de solos a serem estabilizados (adaptado de Miceli Jr, 2006).

Tipo de Solo	LL/LP	% passante nº200	Fonte
Areias	IP máximo de 12%	25 % máximo	Yoder e Witzak (1972)
Pedregulhos e Areia Pedregulhosas	IP máximo de 12%	15 % máximo	
Solos Finos	IP máximo de 18% LL máximo de 40%	35 % máximo	
Solos em Geral	IP máximo de 18% LL máximo de 40%	Entre 10 % e 50%	TRB (1946)
Solos em Geral	IP máximo de 14%	5 % mínimo	Vogt (1971)
Solos arenosos		35 % máximo	DER (1991)
Solos argilosos	IP máximo de 6% LL máximo de 30%	35 % máximo	
Matérias Britados		15 % máximo	ABEDA (2001)
Solos em Geral	IP máximo de 8%	20 % máximo	
Solos em Geral		25 % máximo	ASTM (2006)

É importante comentar que os critérios eleitos pelos diversos autores aqui apresentados constam basicamente das características físicas dos solos, como a granulometria e os limites de consistência. Jacintho (2005) adverte que os processos de estabilização são fortemente influenciados também pelas constituições químicas e mineralógicas dos solos, bem como pela superfície específica dos grãos. Ressalta-se, portanto, a importância da determinação de critérios químicos e mineralógicos que indiquem a potencialidade de uma amostra de solo em ser estabilizada com materiais betuminosos.

Neste contexto, Kézdi (1979) *apud* Miceli Jr (2006), com base em ensaios físico-químicos em vários solos, chegou à conclusão que certos aspectos da

microestrutura do solo a ser estabilizado podem influir no resultado do processo. Destacam-se as seguintes conclusões:

- a) quanto mais sílica a fração argila do solo contiver, mais betume será necessário para uma estabilização satisfatória (caso dos solos tropicais);
- b) quanto mais compostos de ferro e alumínio a fração argila contiver, mais fácil será a estabilização;
- c) o íon sódio, se presente no solo, sempre piora a resistência, enquanto o íon cálcio pode piorar ou melhorar o resultado de uma estabilização, dependendo de sua concentração.

2.4.3.2 *Tipo de Emulsão*

Conforme foi visto anteriormente no item 2.2.3.2, quando uma emulsão entra em contato com o agregado mineral dá-se início o processo de ruptura da emulsão e o conseqüente recobrimento da partícula de solo pelo asfalto. Os processos químicos envolvidos no fenômeno da ruptura são distintos para as diversas associações entre as emulsões (catiônicas ou aniônicas) e agregados (alcalinos ou ácidos).

Foi visto também que as emulsões asfálticas aniônicas são atraídas pela superfície dos agregados eletropositivos (calcário e basalto), enquanto as emulsões catiônicas são atraídas pela superfície dos agregados eletronegativos (granito e quartzo).

Contudo, ABEDA (2001) enumera entre as vantagens da utilização das emulsões asfálticas catiônicas a sua afinidade com todos os tipos de agregados, indicando que essas emulsões também formam filme beuminoso sobre a superfície de agregados eletropositivos.

Soares (2006) justifica o processo de reação entre as emulsões catiônica e os agregados de carga superficial positiva explicando que a parte ácida da emulsão, dispersa na solução aquosa, ataca o material calcáreo, formando o CaCl_2 solúvel, e liberando o íon carboreto negativo (CO_3^-), que irá forrar a superfície do agregado. Este íon, sendo eletrizado negativamente, é atraído pelo grupo NH_3^+ , fixado na superfície do glóbulo de betume, formando com este, o composto NH_3CO_3 (carbonato de amina) que

é insolúvel em água. Assim, há o rompimento da emulsão asfáltica, e ocorre a adesividade entre os glóbulos de betume e os agregados.

As Figuras 2.16 e 2.17 apresentam esquematicamente as reações que ocorrem entre os agregados calcáreos e graníticos com as emulsões catiônicas e aniônicas.

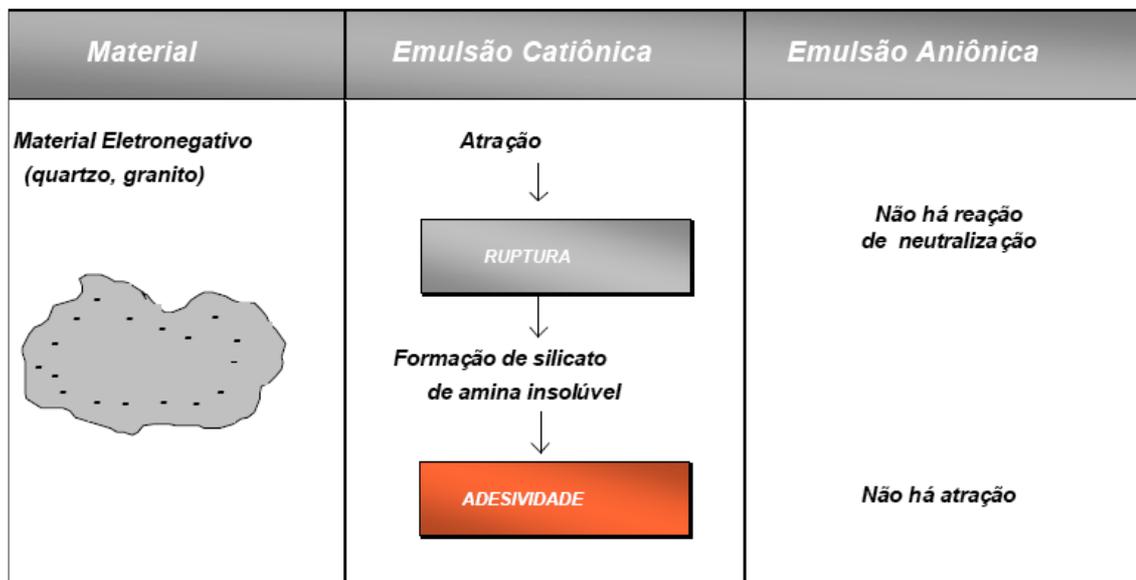


Figura 2.16 - Esquema das reações entre os agregados graníticos e as emulsões asfálticas catiônicas e aniônicas (Nascimento, 2005).

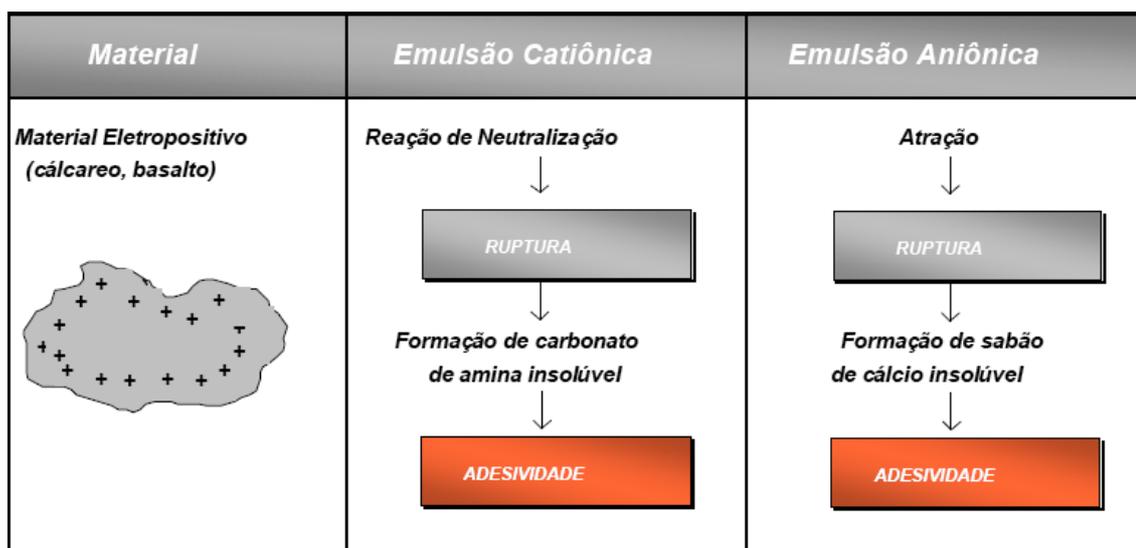


Figura 2.17 - Esquema das reações entre os agregados calcáreos e as emulsões asfálticas catiônicas e aniônicas (Nascimento, 2005).

Conclui-se portanto que, as emulsões catiônicas podem ser utilizadas para estabilização de solos tanto ácidos quanto alcalinos, enquanto as emulsões aniônicas só se mostram efetivas ao serem aplicadas em agregados alcalinos.

Com relação ao tempo de ruptura das emulsões, Ingles e Metcalf (1972) afirmam que se a ruptura da emulsão ocorrer precocemente, haverá uma penetração inadequada dos glóbulos de betume no solo. Por esta razão, estes autores desaconselham a utilização de emulsões de cura rápida para execução de solo-emulsão.

Assim, o tipo de emulsão asfáltica recomendada por diversos órgãos rodoviários e pesquisadores para a técnica solo-emulsão são as emulsões catiônicas de ruptura média ou lenta. ABEDA (2001) estende ainda a recomendação às lamas asfálticas (LAE), dependendo da quantidade de finos reativos do solo.

2.4.3.3 *Teor Ótimo*

O teor ótimo para a estabilização de um solo a partir da adição de emulsão asfáltica é um fator que precisa ser analisado com bastante cautela. Isso se deve ao fato de que à medida que a resistência do solo diminui quando se utiliza teores muito altos de emulsão (devido ao efeito lubrificante do ligante), a impermeabilidade parece ser favorecida. Baixos teores de betume tendem a gerar misturas com maior resistência, ao passo que uma melhor impermeabilização é observada com a adição de maiores teores de material asfáltico. Além disso, a densidade máxima das misturas solo-betume também se mostra dependente do teor de emulsão empregado, e nem sempre o teor que conduz à máxima resistência coincide com o teor responsável para a máxima densidade.

Moreira (2002) utilizou como critério de dosagem para a construção de seu trecho experimental apenas a máxima densidade e a máxima resistência. Esse autor relata ainda que, surgiram algumas falhas em locais aleatórios ao final do período de análise. É possível que essas falhas tenham sido provocadas por uma má determinação do teor ótimo, que possivelmente tenha resultado em um material pouco resistente às ações da água, por exemplo.

Desta forma, verifica-se a necessidade da determinação de um método de dosagem que se pautar no equilíbrio entre as diversas propriedades das misturas solo-betume de importância para a pavimentação.

O pouco desenvolvimento científico sobre a técnica solo-betume dificultou a normatização de um método de dosagem para a técnica. As poucas pesquisas onde houve a preocupação com a determinação de um teor ótimo, desenvolveram métodos próprios de dosagem, não havendo uma uniformidade nos processos. A Tabela 2.7 apresenta os diversos parâmetros de dosagem utilizados por algumas fontes consultadas.

Tabela 2.7 - Parâmetros de dosagem de solo-emulsão (adaptada de Miceli Jr, 2006).

Fonte	Parâmetro de dosagem
DER 3.07/1991 (1991)	MVS (Moisture Vapor Susceptibility) e Hubbard – Field
ASTM D 4223 (2006)	Estabilidade Marshall, Módulo de Resiliência e Resistência à tração indireta
Lucena <i>et al.</i> (1982)	Resistência à compressão simples e Resistência à tração indireta
Guarçoni <i>et al.</i> (1988); Mattos <i>et al.</i> (1991)	CBR e Mini-CBR
Araújo <i>et al.</i> (1983)	Ensaio triaxiais UU

Note-se que a maioria parâmetros de dosagem arbitrados consiste de ensaios já em desuso há muito tempo, como os ensaios de Hubbard-Field ou constitui-se de ensaios inadequados para a avaliação de misturas estabilizadas, como é o caso do CBR.

Falta ainda um procedimento de dosagem que considere os conceitos da Mecânica dos Pavimentos (módulo de resiliência), da Mecânica dos Solos parcialmente saturados (efeitos da sucção) e dos avanços recentemente alcançados da classificação MCT. Assim sendo, quase a totalidade dos procedimentos de dosagem são estrangeiros e não consideram as particularidades dos solos tropicais, ou utilizam ensaios não adequados como o ensaio CBR (Miceli Jr, 2006).

2.4.3.4 Tempo de Aeração

Para que haja o início do processo de ruptura da emulsão é necessário que as amostras sejam submetidas a uma secagem ao ar livre antes da compactação. Essa secagem prévia é conhecida como tempo de aeração. Ingles e Metcalf (1972) afirmam que a aeração aumenta a estabilidade e diminui a absorção de água e que há um período de aeração ótimo.

Numa tentativa em se identificar o tempo de aeração ótimo de uma mistura solo-betume, Carvalho *et al.* (1992) analisaram a influência do tempo de aeração de 1h, 2h, 3h e 4h sobre a resistência de solos estabilizados com emulsão nos teores de 5%, 7%

e 9%. Baseando-se nos valores dos resultados de resistência isoladamente, observou-se uma maior resistência para os teores de 7% e 9% após 4 horas de aeração, enquanto para o teor de 5% a maior resistência se deu com 1 hora de aeração apenas. Além disso, a variação da resistência com relação a variação do tempo de aeração não obedeceu a um mesmo padrão de comportamento, conforme pode ser verificado na Figura 2.18.

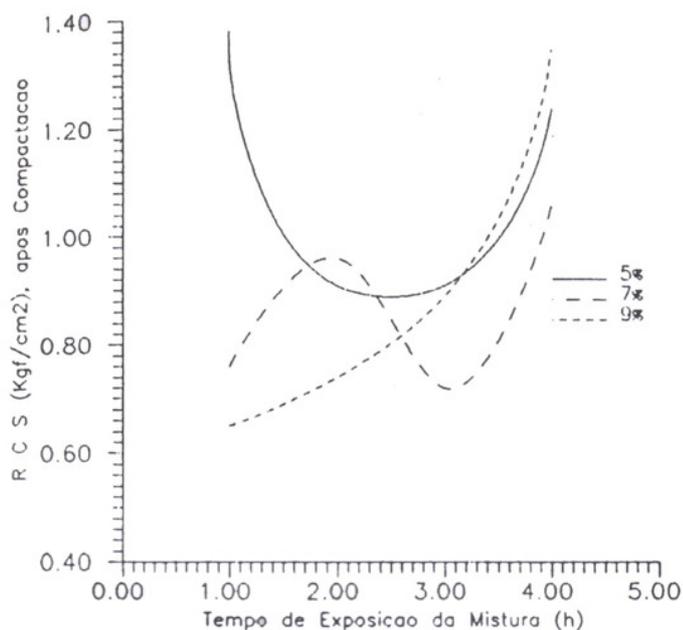


Figura 2.18 - Resistência à compressão simples em função do tempo de aeração (Carvalho *et al.*, 1992)

A resistência da mistura com 5% de emulsão variou parabolicamente com o tempo de aeração, de forma que existe para esta mistura um tempo de aeração que gera uma resistência mínima, mas não há um teor para a determinação da resistência máxima. Para a mistura com 7% de emulsão, observou-se uma curva de um pico e meio, o que também não define o tempo de aeração ótimo. Já para a mistura com 9% de emulsão, verificou-se que a resistência crescia hiperpolicamente com o aumento do tempo de aeração. Esses resultados indicaram, portanto, que as misturas solo-emulsão são susceptíveis ao tempo de aeração, mas não se encontraram subsídios para determinação do tempo ótimo.

Jacinto (2005), ao avaliar este parâmetro, baseado em ensaios de resistência à compressão simples de três solos diferentes, concluiu que os acréscimos de resistência observados se relacionaram geralmente com a variação de umidade, e não com o fator aeração.

Desta forma, verifica-se a importância do monitoramento da perda de umidade durante o processo de aeração, para que se possam obter conclusões mais expressivas sobre o assunto.

2.4.3.5 *Processo de Cura*

O processo de cura das misturas solo-emulsão é uma etapa indispensável para que ocorram as reações entre a emulsão e o solo. É durante o processo de cura que ocorre a evaporação da água da emulsão, facilitando a formação do filme betuminoso sobre as partículas do solo.

A importância da cura é atestada por diversos pesquisadores, como Carvalho *et al.* (1992) e Miceli Jr (2006). Carvalho *et al.* (1992) observaram incrementos de resistência da ordem de 600% a 1000% das misturas solo-emulsão após a secagem em estufa a 40°C, se comparados à resistência obtida pelas misturas rompidas logo após a moldagem. Miceli Jr (2006), ao avaliar a resistência dos solos após os períodos de 7 dias e de 28 dias de cura, verificou inclusive que a resistência das misturas tende a aumentar com o prolongamento do período de secagem.

A cura acelerada em estufa também parece favorecer o comportamento mecânico das misturas solo-emulsão. Dunn e Salen (1973) citado por Ferreira (1980) encontraram significativos aumentos na resistência ao cisalhamento de misturas solo-emulsão, ao se aumentar a temperatura de cura. Contudo, com o uso de temperaturas mais elevadas que 60°C, percebeu-se que os incrementos de resistência ao cisalhamento tornavam-se cada vez menores. Ferreira (1980) ensaiou seus corpos de prova após cura em estufa a 60°C por 24 horas. Este pesquisador afirma que o processo de cura empregado mostrou-se satisfatório, podendo ser indicado para trabalhos futuros.

O tipo de cura empregado também exerce grande influência sobre a qualidade da mistura solo-emulsão. Miceli Jr (2006) submeteu suas amostras a dois tipos diferentes de cura: cura em câmara úmida e cura seca ao ar. Miceli Jr (2006) averigüou que o processo de cura úmida, ao contrário da cura seca, não possibilita melhorias no comportamento mecânico das misturas. Diante do exposto, deduz-se que o processo de cura das misturas solo-emulsão deve necessariamente envolver a perda de água, para que ocorram as reações inerentes a esta técnica.

Por este motivo, o Road Research Laboratory (1951) indica a utilização da técnica solo-emulsão em regiões de clima seco, visto que este clima não impede a perda de umidade da camada, ao contrário do que ocorre em climas temperados. Entretanto, é importante ressaltar que em climas secos há uma maior dificuldade em se controlar a perda de água, devendo os técnicos responsáveis redobrar a atenção com relação a este aspecto do método construtivo.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a elaboração deste capítulo buscou-se fazer um levantamento de informações sobre o uso do solo-betume em várias partes do mundo, bem como as peculiaridades inerentes a esta técnica. Procurou-se entender os processos físicos e químicos envolvidos na estabilização de solos por meio da adição de emulsão, com o intuito de criar subsídios para a escolha dos materiais a serem empregados na presente pesquisa, assim como para a determinação do melhor método de análise de desempenho da técnica.

Foi verificada a ausência de uma metodologia capaz de delinear confiavelmente os parâmetros aos quais a técnica de estabilização betuminosa deva se enquadrar, principalmente no que se refere à determinação do teor ótimo de emulsão nas misturas. Esta deficiência pode ser explicada pelo grande número de variáveis que influenciam nas características das misturas, tornando desaconselhável a generalização de soluções pontuais como soluções de utilização universal.

Embora as misturas de solo-betume já tenham sido empregadas com sucesso no estado do Ceará durante a década de 80, nenhum levantamento científico foi realizado com o intuito de explicar os processos que ocorrem nos solos locais após a adição de emulsões asfálticas. Neste contexto, o presente trabalho surge como uma primeira investigação sobre a aplicabilidade da técnica solo-betume em solos cearenses.

O próximo capítulo traz uma descrição detalhada do processo de escolha dos materiais empregados no presente trabalho, assim como a determinação da metodologia a ser seguida para o alcance dos objetivos dessa pesquisa.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo tem como objetivo apresentar o processo de escolha e a descrição dos materiais empregados nesta pesquisa, bem como o programa experimental aplicado, explicitando os diversos métodos adotados na realização dos experimentos.

Ressalta-se que a área definida como objeto de estudo da presente pesquisa foi o agropólo do Baixo Jaguaribe, no estado do Ceará, conforme foi definido no Capítulo 1. Este agropólo é constituído por 15 municípios (ver Figura 3.1): Limoeiro do Norte, Russas, Tabuleiro do Norte, São João do Jaguaribe, Morada Nova, Ibicuitinga, Jaguaruana, Palhano, Quixeré, Alto Santo, Icapuí, Itaíba, Aracati, Jaguaribara e Nova Jaguaribara. Rabêlo (2006) descreveu essa região em sua dissertação de mestrado.

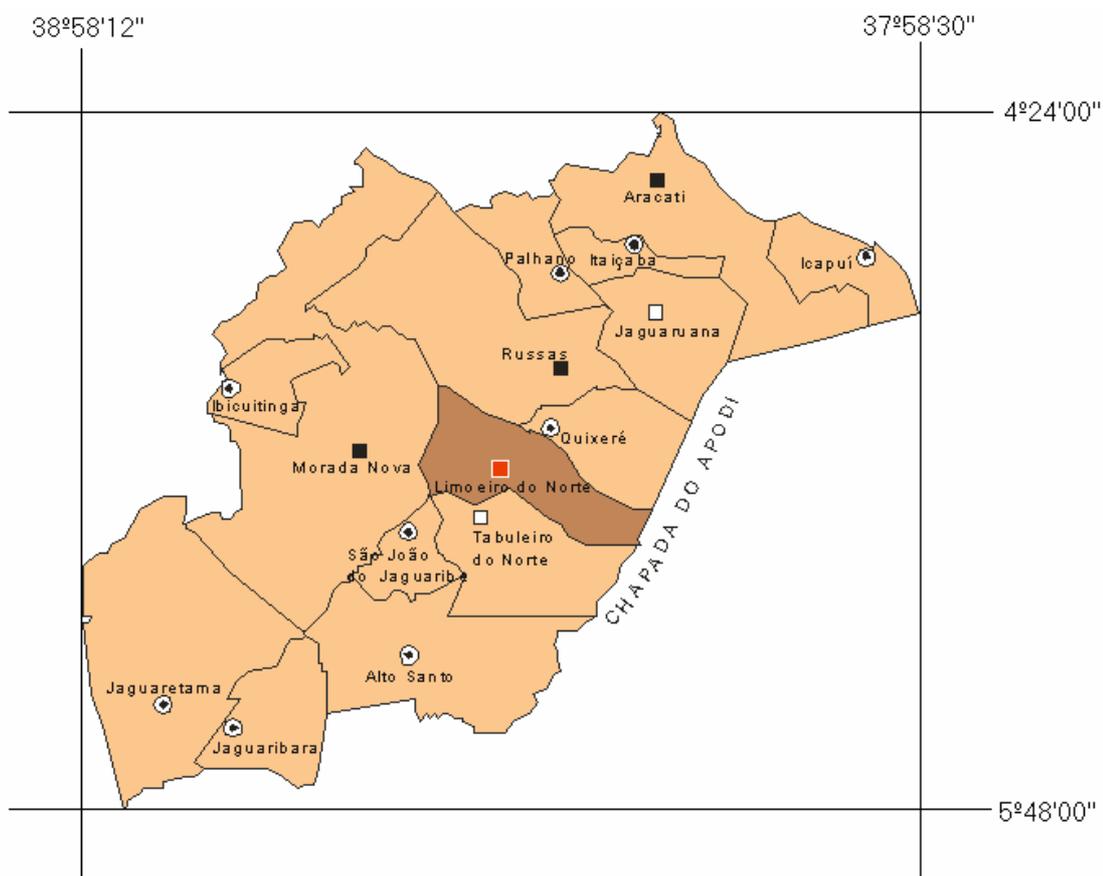


Figura 3.1 - Localização geográfica e divisão municipal do agropólo Baixo Jaguaribe (mapa fornecido pela SEAGRI, 2006).

A metodologia da presente pesquisa foi cumprida seguindo a realização das seguintes etapas:

- a) levantamento bibliográfico sobre as classes pedológicas, clima e relevo da área em estudo;
- b) cruzamento dos mapas de pedologia, clima e relevo;
- c) escolha das amostras de solos baseada na ocorrência de cada classe pedológica nas diferentes condições de clima e relevo;
- d) coleta, preparação e caracterização das amostras de solo, (análise granulométrica, índices de plasticidade, determinação da densidade real, compactação, análise química, fluorescência de Raios X e difratometria de Raios X);
- e) escolha e caracterização da emulsão (viscosidade Saybolt Furol, teor de resíduo, carga da partícula e sedimentação);
- f) ensaios de resistência mecânica com os solos e as misturas solo-emulsão (compactação Proctor, resistência à compressão simples, módulo de resiliência e resistência à tração indireta);
- g) determinação do melhor teor de emulsão para cada tipo de solo;
- h) ensaios de LWT (loaded wheel test) e WTAT (wet track abrasion test) adaptados para a avaliação da resistência ao desgaste;
- i) compilação e tratamento dos dados obtidos nos ensaios;
- j) análise de resultados;
- k) redação da dissertação.

3.2 ESCOLHA DOS MATERIAIS

3.2.1 Solos

O primeiro passo dado para a escolha dos solos foi o levantamento das condições de clima e relevo do território do agropólo do Baixo Jaguaribe. O levantamento das condições de relevo da região é de fundamental importância. Diferentes condições topográficas indicam variações nos processos geomorfológicos. Logo, regiões de diferentes topografias tendem a apresentar solos de comportamentos discrepantes.

Souza *et al.* (1979) apresentam uma compartimentação topográfica do território cearense. Essa divisão, de acordo com esses autores, decorre de um jogo de influência em que participam a estrutura geológica, os fatores paleoclimáticos e a dinâmica morfogenética atual. A dinâmica morfogenética, caracterizada fortemente pelos processos erosivos, sofre, por sua vez, grande influência das condições climáticas. Daí a importância do levantamento do fator clima para a escolha dos solos.

A referida compartimentação é composta pelas seguintes unidades: planície litorânea, tabuleiros sub-litorâneos, depressão sertaneja, chapada do Apodi, chapada do Araripe, planalto da Ibiapada, maciços residuais cristalinos, cristas residuais e inselbergs e planícies fluviais.

Na área do agropólo do Baixo Jaguaribe, três dessas unidades são bastante evidenciadas: os tabuleiros sub-litorâneos, depressão sertaneja e chapada do Apodi. Para o zoneamento da região baseada nas unidades aqui especificadas, recorreu-se aos mapas de clima e topografia da região.

Pela observação do Modelo Digital do Terreno (IPECE, 2007), mostrado na Figura 3.2, é possível observar com clareza e a localização da chapada do Apodi e sua representatividade, em termos de área ocupada, na região. A linha vermelha foi incorporada ao mapa com o intuito de evidenciar os limites da chapada.

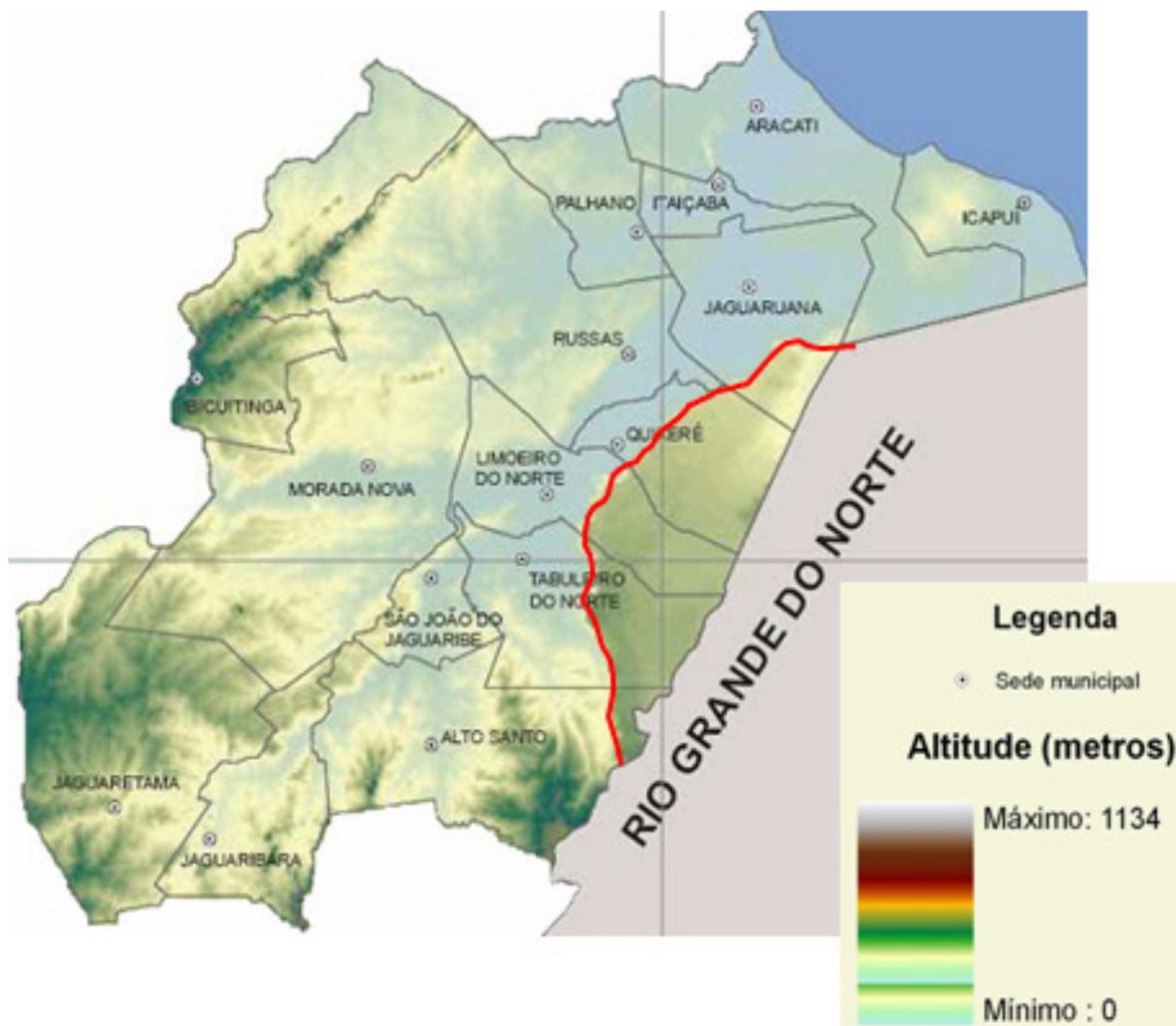


Figura 3.2 - Modelo Digital do Terreno do Agropólo do Baixo Jaguaribe obtido a partir do Modelo Digital do Terreno do Estado do Ceará (IPECE, 2007).

Para fins de determinação das áreas de influência dos tabuleiros sub-litorâneos e da depressão sertaneja recorreu-se ao mapa de tipos climáticos (ver Figura 3.3). Nesse mapa observam-se apenas dois tipos de clima: o tropical quente semi-árido, característico do sertão, e o tropical quente semi-árido brando, característico da zona litorânea. A linha vermelha inserida na Figura 3.3 teve o intuito de evidenciar a separação entre as duas áreas climáticas. Os municípios onde predomina o clima tropical quente semi-árido apresentam uma precipitação anual média variando 700 a 850 mm, enquanto a precipitação pluviométrica anual média dos municípios dominados pelo clima tropical quente semi-árido brando varia de 700 a 950 mm.

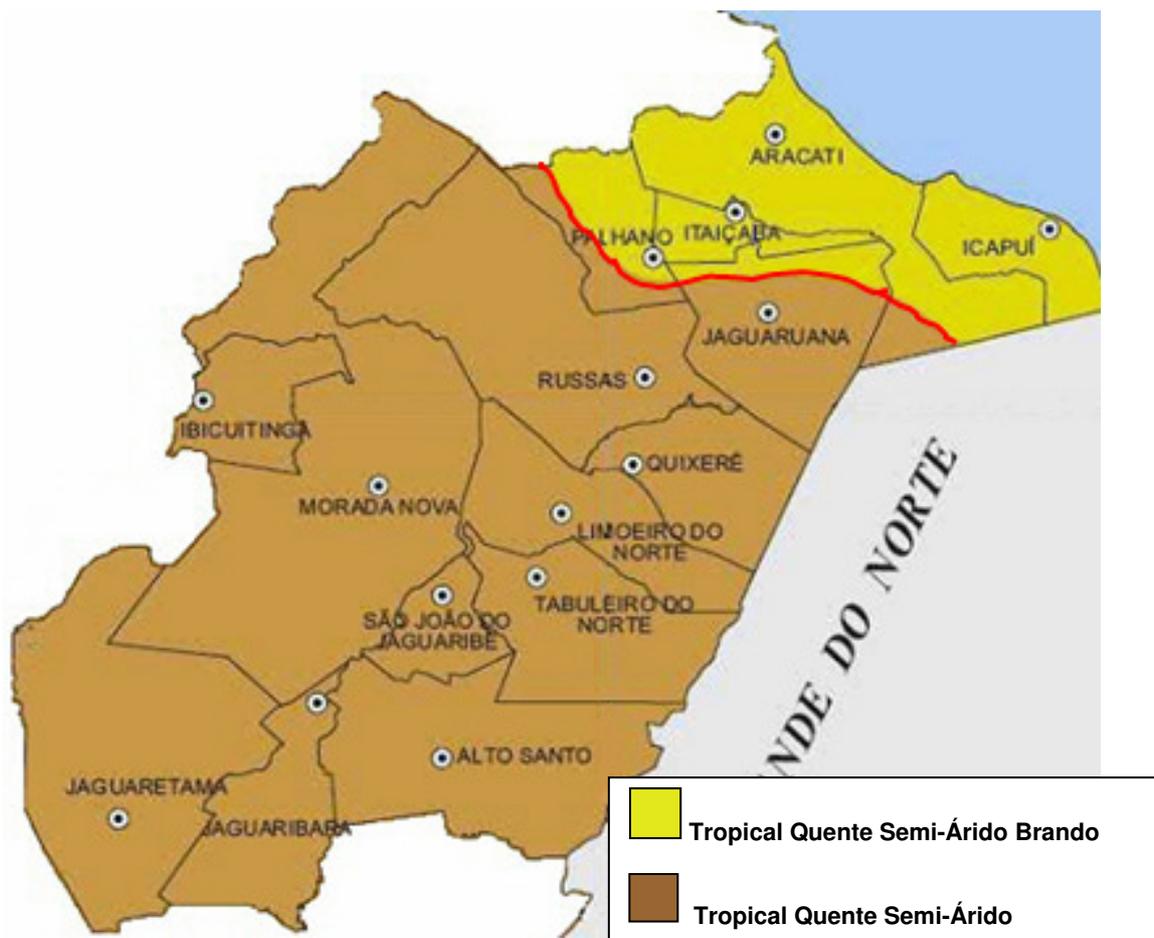


Figura 3.3 - Mapa Climático do Agropólo do Baixo Jaguaribe obtido a partir do Mapa Climático do Estado do Ceará (IPECE, 2007).

A partir dos mapas apresentados nas Figuras 3.2 e 3.3 foi possível então promover a divisão do agropólo em três regiões de condições climáticas e topográficas distintas: Litoral, Sertão e Chapada. A Figura 3.4 consiste do mapa pedológico do agropólo onde são evidenciadas as três regiões especificadas.

Uma vez dividido o mapa, foi escolhida para cada região a classe pedológica de maior ocorrência. Dessa forma, a classe escolhida para a região litorânea foi a dos neossolos. Para a região sertaneja a classe eleita foi a dos planossolos. Já a chapada do Apodi é composta integralmente pela classe dos cambissolos. Vale ressaltar aqui que essas três classes reunidas representam cerca de 33% dos solos do agropólo do baixo Jaguaribe, sendo que os neossolos quartzarênicos representam 6,99%, os planossolos representam 15,71% e os cambissolos representam 9,61% dos solos da região em estudo.

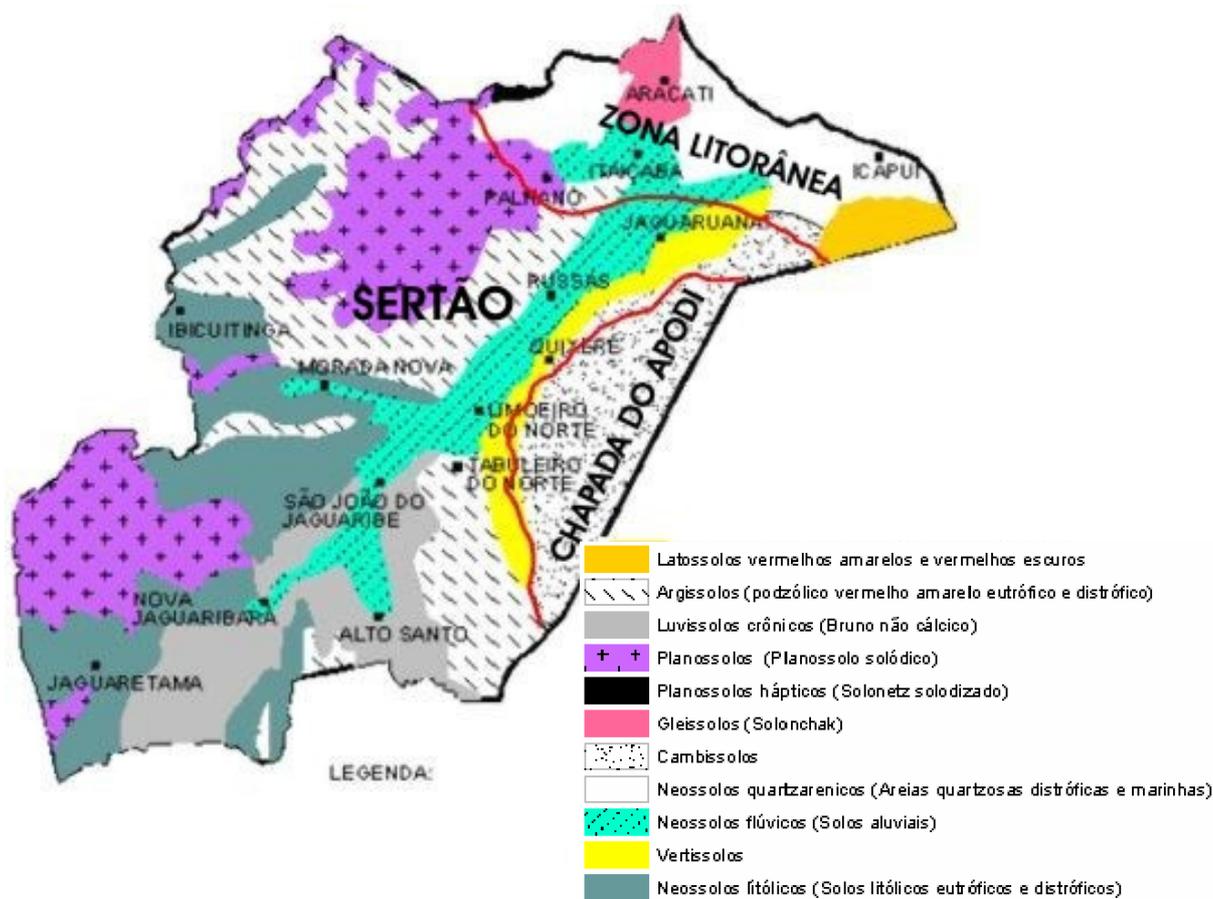


Figura 3.4 - Mapa pedológico do agropólo Baixo Jaguaribe (Rabêlo, 2006).

Rabêlo (2006) identificou pedologicamente e registrou as coordenadas geográficas de 15 jazidas espalhadas no agropólo em estudo. Ao pesquisar este banco de dados à procura por jazidas que atendessem aos requisitos pedológicos e geográficos definidos anteriormente, houve a definição dos três solos que foram estudados neste trabalho. A Tabela 3.1 apresenta a localização e a profundidade de coleta das amostras definidas. Logo em seguida, faz-se uma descrição mais detalhada de cada uma dessas amostras.

Tabela 3.1 - Localização e classificação das amostras.

Amostra	Área	Profundidade de coleta	Classe Pedológica	Coordenadas Geográficas	
				Latitude	Longitude
A	Litoral	7 metros	Neossolo Quartzarênico	04° 45' 01" S	37° 18' 14" W
B	Sertão	50 - 100 cm	Planossolo	05° 04' 52" S	38° 23' 2" W
C	Chapada	50 - 100 cm	Cambissolo	05° 07' 33" S	37° 58' 53" W

3.2.1.1 Amostra A

A amostra A localiza-se no município de Icapuí, litoral do agropólo. Esse solo pertence à classe dos neossolos quartzarênicos. A Figura 3.5 apresenta sua localização enquanto a Figura 3.6 ilustra o aspecto deste solo.

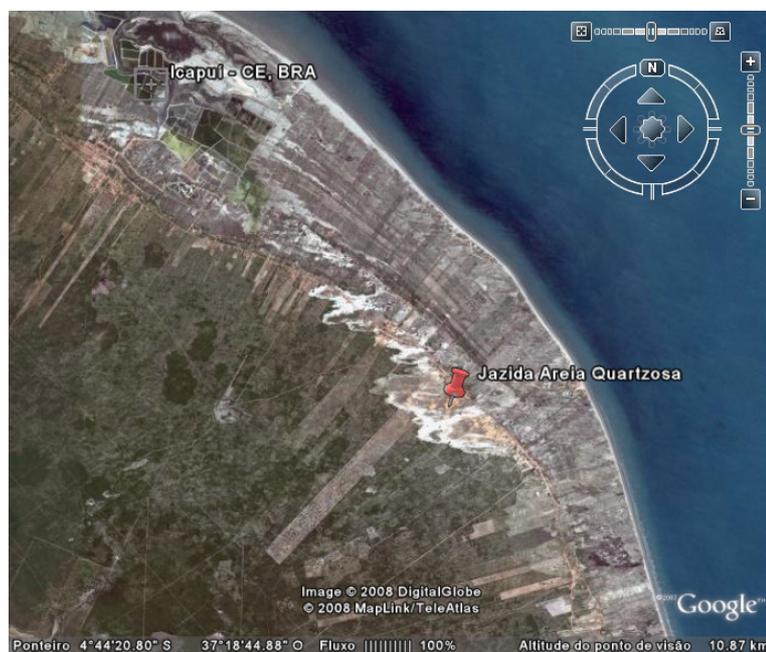


Figura 3.5 - Localização da jazida A.



Figura 3.6 - Aspecto da jazida A.

3.2.1.2 Amostra B

A amostra B pertence à classe dos planossolos e foi coletada às margens da rodovia CE-138, no município de Morada Nova, no sertão do agropólo. Sua localização e seu aspecto encontram-se ilustrados nas Figuras 3.7 e 3.8, respectivamente.

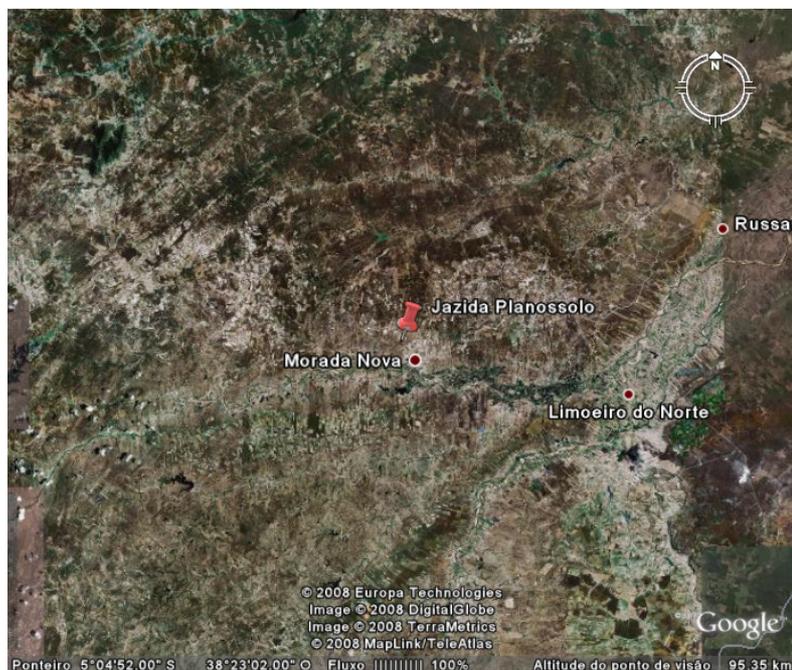


Figura 3.7 - Localização da jazida B.



Figura 3.8 - Aspecto da jazida B.

3.2.1.3 Amostra C

A amostra C é proveniente do município de Quixeré, na chapada do Apodi. A classe pedológica a qual pertence, os cambissolos, domina todo o território da chapada. Observa-se nas Figuras 3.9 e 3.10 a seguir a localização e o aspecto geral desta jazida, respectivamente.



Figura 3.9 - Localização da jazida C.



Figura 3.10 - Aspecto da jazida C.

3.2.2 Emulsão Asfáltica

Buscando facilitar a mistura do solo com a emulsão, optou-se pelo uso de uma emulsão catiônica de ruptura lenta (RL-1C) devido a sua melhor trabalhabilidade em comparação às emulsões de ruptura média.

A emulsão utilizada foi fornecida pela empresa Asfaltos Nordeste, em recipientes de 20 litros, totalizando 60 litros. Posteriormente este material foi distribuído em recipientes de 3 litros, visando facilitar o manuseio durante a realização dos ensaios. O tempo máximo de estocagem adotado para a emulsão asfáltica foi de três meses.

3.3 O PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.3.1 Considerações Gerais

Para atingir o objetivo desta pesquisa, foi analisada a influência exercida por alguns fatores sobre a resistência dos solos em estudo. Os fatores escolhidos foram: teor de emulsão, tempo de cura da mistura e forma de distribuição da emulsão no corpo de prova. A motivação para o estudo da distribuição da emulsão foi a experiência de campo relatada por Santana (1976), que consistiu da aplicação da emulsão em gradiente no solo.

Os parâmetros eleitos para a análise de resistência das misturas solo-emulsão foram de dois tipos: resistência mecânica (resistência a compressão simples, Índice de Suporte Califórnia, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência) e resistência ao desgaste (LWT e WTAT adaptados).

Os teores de emulsão, determinados em relação ao peso do solo, foram: 2% (entendido como baixo teor), 5% (considerado teor intermediário) e 8% (considerado um teor alto). As misturas nesses teores foram comparadas aos solos sem aplicação de aditivo (teor 0%).

As misturas foram submetidas à cura seca ao ar pelos períodos de 7 dias e de 28 dias. Como base para comparação, também foram realizados ensaios logo após a moldagem do corpo de prova, sem cura, chamados ensaios imediatos. Vale ressaltar aqui o fato de que a resistência de um solo compactado sem aditivos, após secagem,

apresenta significativo incremento em seu valor. Com o intuito de verificar a real influência da adição da emulsão, os solos compactados sem aditivo também foram submetidos à cura seca ao ar pelo período de 7 dias.

A Figura 3.11 apresenta o esquema geral dos corpos de prova moldados nesta pesquisa, bem como os tempos de cura aos quais cada corpo de prova foi submetido.

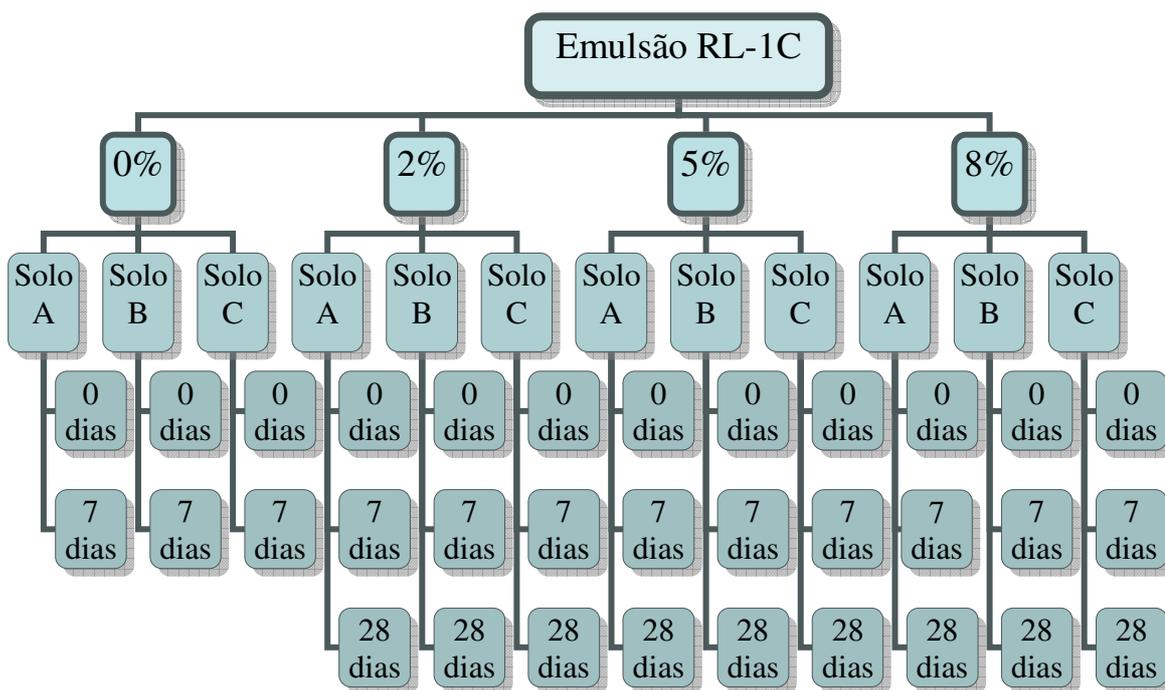


Figura 3.11 - Esquema geral dos corpos de prova produzidos.

Uma vez realizados os ensaios de resistência mecânica em todos os teores, escolheu-se para cada solo o teor que ofereceu maior incremento de resistência. Procedeu-se a compactação de novos corpos de prova com esses teores, desta vez distribuindo a emulsão em forma de gradiente. A moldagem de corpos de prova em gradiente dá-se de forma que as camadas superiores dos corpos de prova apresentem mais emulsão que as camadas inferiores, conforme pode ser observado na Figura 3.12. O item 3.3.3 apresentará o método de mistura, bem como o detalhamento do processo de distribuição da emulsão em gradiente.



Figura 3.12 - Aspecto da distribuição da emulsão em gradiente em um corpo de prova.

O último procedimento experimental foi a realização da análise da resistência ao desgaste. Foram submetidos a estes ensaios os solos puros e as misturas solo-emulsão, em seu teor ótimo, em distribuição homogênea e em gradiente, todos submetidos ao tempo de cura seca ao ar de 7 dias.

São descritos a seguir os procedimentos adotados para a realização de cada ensaio do programa experimental.

3.3.2 Caracterização dos Solos

Os solos coletados foram acondicionados em sacos de 50 kg para serem transportados até o laboratório. Esses materiais foram secos em estufa a 55°C, destorroados e quarteados, a fim de se obter maior homogeneização. A preparação do material para caracterização seguiu as prescrições da norma DNER ME 041/94 Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização.

3.3.2.1 Caracterização Geotécnica

A caracterização geotécnica dos solos foi realizada no laboratório de solos do LMP/UFC (Laboratório de Mecânica dos Pavimentos/Universidade Federal do Ceará). Para a execução dos ensaios foram seguidos os procedimentos das normas indicadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Ensaios para a caracterização geotécnica dos solos.

Ensaio	Norma
Solos-Determinação da Densidade Real	DNER ME 093/94
Solos-Análise Granulométrica	DNER ME 051/94
Solos-Determinação do Limite de Liquidez	DNER ME 122/94
Solos-Determinação do Limite de Plasticidade	DNER ME 082/94

3.3.2.2 *Classificação MCT*

Visando enquadrar os solos na classificação de solos tropicais MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), realizaram-se os ensaios de mini-MCV e perda de massa por imersão, segundo os métodos de ensaio DNER ME 258/94 - Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-MCV e DNER ME 256/94 - Solos compactados em equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão. Estes ensaios foram realizados no LMSP (Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação) da Universidade Federal do Ceará.

3.3.2.3 *Caracterização Química*

No âmbito deste trabalho, a caracterização química teve o intuito de verificar a composição dos solos, além de fazer o levantamento de parâmetros que possam exercer certa influência nas misturas de solo-emulsão.

Essa caracterização foi realizada no Laboratório de Solos e Água, do Departamento de Ciências do Solo, Centro de Ciências Agrárias da UFC. Foram determinados para cada solo: pH em água, pH em KCl, Matéria Orgânica (MO), Condutividade Elétrica, Soma dos Cátions Trocáveis (S), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Saturação de Alumínio (%Al) e Saturação de Bases (%V), seguindo os procedimentos preconizadas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1997).

3.3.2.4 *Fluorescência de Raios X*

A fluorescência de Raios X foi realizada nesta pesquisa para a determinação da composição química dos solos e da proporção dos óxidos ocorrentes no mesmo. Estes ensaios foram executados no equipamento Rigaku (ZSX Mini II) pelo Laboratório de Raios X, do Departamento de Física da UFC. A Figura 3.13 ilustra o equipamento utilizado.



Figura 3.13 - Equipamento Rigaku (ZSX Mini II) pertencente ao Laboratório de Raios X da UFC.

3.3.2.5 *Difratometria de Raios X*

As amostras de solo estudadas nesta pesquisa foram submetidas à difratometria de Raios X, com o intuito de se identificar os minerais formadores da fase cristalina de cada uma dessas amostras. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Raios X, do Departamento de Física da UFC, por meio do equipamento Difratorômetro de Raios X/Rigaku (DMAXB), ilustrado na Figura 3.14.



Figura 3.14 - Equipamento Rigaku (DMAXB) pertencente ao Laboratório de Raios X da UFC.

3.3.3 **Caracterização da Emulsão**

Os ensaios de caracterização da emulsão asfáltica empregada foram realizados no laboratório de ligantes do LMP/UFC e seguiram os procedimentos descritos nas normas da Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Ensaio para a caracterização da emulsão asfáltica.

Ensaio	Norma
Materiais Betuminosos - determinação da viscosidade Saybolt Furol	DNER ME 004/94
Emulsões asfálticas - determinação da sedimentação	DNER ME 006/00
Emulsão asfáltica - carga da partícula	DNER ME 002/98
Emulsões asfálticas - determinação do resíduo de destilação	NBR 6568

3.3.4 Processo de Mistura Solo-Emulsão

Três são os elementos que compõem a dosagem das misturas de solo-emulsão: o solo, a emulsão e a água a ser adicionada. Entretanto, a determinação da quantidade de água a ser aplicada na mistura deve levar em consideração não apenas a umidade higroscópica do solo, mas também a quantidade de água contida na emulsão.

O cálculo da água a ser adicionada para a obtenção de uma dada umidade compõe-se dos seguintes passos:

1- Determinação da massa de solo seco de amostra (P_s), por meio do uso da expressão 3.1:

$$P_s = \text{Massa de solo} / 100 + h(\%) \quad (3.1)$$

Onde h é a umidade higroscópica, expressa em percentual.

2- Determinação da quantidade de emulsão (P_e) pela equação:

$$P_e = \text{teor de emulsão} \times P_s \quad (3.2)$$

3- Determinação da quantidade de água contida na emulsão (A_{em}):

$$A_{em} = (100 - \% \text{ de CAP na emulsão}) \times P_e \quad (3.3)$$

4- Cálculo da quantidade de água total (A_t) para obtenção de determinada umidade:

$$A_t = (\text{teor de umidade requerido} - \text{umidade higroscópica}) \times P_s \quad (3.4)$$

5- Determinação da quantidade de água a ser acrescentada à mistura (A_m):

$$A_m = A_t - A_{em} \quad (3.5)$$

Cuidados especiais são requeridos para o processo de mistura dos três elementos. Para a obtenção de uma mistura homogênea deve-se levar em consideração a dificuldade de dispersão da emulsão no solo e a avidéz do solo seco por água.

Devido à sua viscosidade, a emulsão asfáltica pura encontra grande dificuldade em se dispersar no solo. Por este fato, há unanimidade entre os pesquisadores na decisão em se diluir a emulsão asfáltica anteriormente a sua aplicação no solo. A água utilizada para diluir a emulsão é chamada água de diluição.

Por ser o solo um material higrófilo (ávido por água), a adição de emulsão asfáltica diretamente no solo seco ou com baixa umidade pode acelerar o processo de ruptura da emulsão. Visando evitar tal acontecimento, deve-se aplicar certa quantidade de água ao solo, aumentando sua umidade antes da aplicação do aditivo. Essa água é designada água de dispersão.

O somatório da água de diluição e da água de dispersão deve compor a quantidade de água a ser acrescida à mistura (A_m). Lucena *et al.* (1982) e Araújo *et al.* (1983) recomendam que a diluição seja feita por 1 (uma) parte de água para 1 (uma) parte de emulsão asfáltica, e o restante da água a ser acrescida deve ser utilizada como água de dispersão.

Entretanto, nem sempre é possível executar essa proporção. Há casos em que a quantidade de emulsão asfáltica é maior que a quantidade de água a ser aplicada ao solo. Isso ocorre geralmente em altos teores de emulsão ou em baixas umidades de compactação. No âmbito desta pesquisa tentou-se trabalhar com a relação 1 (uma) parte de água de diluição para 1 (uma) parte de emulsão asfáltica. Porém, a prioridade era dada à água de dispersão, pois a autora deste trabalho julga mais preocupante a ruptura prematura da emulsão do que a não homogeneidade, uma vez que a ruptura da emulsão antes da compactação poderia resultar em mudanças nos parâmetros de Proctor das misturas.

Em posse da dosagem da mistura, seguiu-se o procedimento descrito nos itens de 1 a 7, que se seguem, para a execução da mistura:

- 1- despeja-se o solo sobre uma bandeja,
- 2- aplica-se a água de dispersão ao solo;
- 3- promove-se a mistura manual do solo + água de dispersão;
- 4- adiciona-se a água de diluição à emulsão asfáltica (não ilustrado);
- 5- aplica-se a emulsão diluída ao solo;
- 6- procede-se uma homogeneização manual inicial da mistura;
- 7- submete-se esse material à ação de um misturador mecânico, a fim de se obter uma mistura mais homogênea.

A Figura 3.15 ilustra o procedimento descrito anteriormente, do passo 1 ao passo 7 (exceto o passo 4).



Figura 3.15 - Processo de mistura solo-emulsão.

No âmbito desta pesquisa, foi analisada também uma forma diferente de distribuição de emulsão: a distribuição em gradiente. A motivação para a investigação dessa forma de distribuição foi a tentativa de testar em laboratório a experiência realizada em campo por Santana (1976), conforme foi explanado no item 2.4.1.

Para realização desta investigação foi necessário inserir uma pequena modificação no processo de mistura descrito anteriormente. Para tal tarefa, os seguintes passos foram executados:

- 1- aplicação e homogeneização da água de dispersão no solo;
- 2- divisão da quantidade de emulsão em três partes iguais;
- 3- diluição e aplicação do primeiro terço da emulsão à massa total de solo;
- 4- mistura manual inicial;
- 5- mistura mecânica;
- 6- retirada de um pouco de material para cálculo da umidade desta camada;
- 7- retirada e pesagem da primeira camada de solo;
- 8- aplicação do segundo terço da emulsão à massa restante de solo;
- 9- processo de mistura da segunda camada;
- 10- retirada e pesagem da segunda camada, bem como monitoramento da umidade;
- 11- aplicação do terceiro terço da emulsão à massa restante de solo;
- 12- processo de mistura da terceira camada;
- 13- monitoramento da umidade da terceira camada.

A Figura 3.16 ilustra o processo de mistura do solo para distribuição da emulsão em gradiente, bem como o aspecto geral das três camadas dessa distribuição.



Adição da água de dispersão



Aplicação do 1º terço da emulsão



Mistura manual



Mistura mecânica



Aspecto da 1ª camada



Pesagem da 1ª camada



Aplicação do 2º terço da emulsão



Mistura mecânica



Aspecto da 2ª camada



Pesagem da 2ª camada



Aplicação do 3º terço da emulsão



Mistura mecânica



Aspecto da 3ª camada



Aspecto das 3 camadas



Seção transversal do CP

Figura 3.16 - Processo de mistura para distribuição em gradiente e aspecto das diferentes camadas.

3.3.5 Estudo de Resistência Mecânica

O estudo de resistência mecânica das misturas solo-emulsão constituiu a segunda fase do presente trabalho, tendo a primeira fase sido constituída pela escolha e caracterização dos materiais empregados. Nesta fase, foram realizados os ensaios de compactação, resistência à compressão simples, módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral.

O intuito deste estudo não foi apenas investigar as alterações ocorridas nos solos a partir da adição dos diversos teores de emulsão e dos diversos tempos de cura, mas foi também uma tentativa de se descobrir o teor ótimo de emulsão para cada solo.

As moldagens de todos os corpos de prova desta pesquisa foram realizadas por meio de compactador mecânico à energia intermediária de compactação. Os itens seguintes abordam detalhadamente as normas e condições de execução de cada um dos ensaios propostos.

3.3.5.1 Compactação

Os solos puros e as misturas solo-emulsão foram submetidos à compactação com amostras não trabalhadas à energia intermediária de compactação. Buscou-se, assim, investigar a influência dos teores de emulsão nas curvas de compactação dos solos.

Fez-se necessária a execução do ensaio com amostras não trabalhadas, pois a emulsão asfáltica poderia sofrer ruptura durante o processo de compactação e alterar, erroneamente, a curva de compactação.

Para realização deste ensaio foram seguidas as recomendações da norma DNER ME 129/94 Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas. Entretanto, visando reduzir a quantidade de material necessário, foi utilizado o molde Proctor pequeno (10 cm de diâmetro por 12,7 cm de altura) e não o molde preconizado pela referida norma.

3.3.5.2 Resistência à Compressão Simples

Para a determinação da resistência à compressão simples nas misturas solo-emulsão não existe norma específica. Os ensaios realizados nesta pesquisa foram

executados segundo adaptações da norma DNER ME 201/94 - Solo-Cimento - Compressão Axial de Corpos de Prova Cilíndricos. O método para a determinação da resistência à compressão constou dos seguintes passos:

1. moldagem do corpo de prova na umidade ótima, no cilindro Proctor, na energia intermediária;
2. a compressão foi realizada em uma prensa semelhante à de ISC (Índice de Suporte Califórnia), movimentando-se a 1,27mm/min, e não a 1mm/min como fora recomendado pela norma supracitada. Essa adaptação foi necessária devido à capacidade de movimentação da prensa disponível. Foi adaptado um disco de 100 g no topo do corpo de prova, a fim de garantir distribuição uniforme da carga pela área do cilindro (ver Figura 3.17);
3. foram executadas leituras periódicas das pressões, a fim de se traçar um gráfico característico de Tensão \times Deformação;
4. foram realizados ensaios em três corpos de prova para cada amostra e utilizou-se a média desses resultados.



Figura 3.17 - Ensaio de resistência à compressão simples.

3.3.5.3 Índice de Suporte Califórnia

Para a determinação dos valores de Índice de Suporte Califórnia foram moldados corpos de prova na umidade ótima e sob energia de compactação intermediária. A realização desses ensaios baseou-se na norma DNER ME 049/94 Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Foram ensaiados, por amostra, três corpos de prova moldados sob as mesmas condições.

Os corpos de prova que foram submetidos ao processo de cura permaneceram dentro dos cilindros por todo o período necessário. Ressalta-se que os corpos de prova só foram imersão após o período completo de cura. Desta forma, o tempo decorrido entre a moldagem do corpo de prova e o ensaio propriamente dito foi composto pelo período de cura e pelo período de imersão.

3.3.5.4 *Resistência à Tração por Compressão Diametral*

Com o intuito de verificar a possibilidade da utilização da camada de solo-emulsão sem aplicação de revestimento, foram realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral. Visando comparar os valores obtidos com valores típicos de misturas asfálticas empregadas em revestimento, seguiu-se, sem adaptações, a norma DNER ME 138/94 - Misturas betuminosas- determinação da resistência à tração por compressão diametral. Para o resultado da resistência à tração por compressão diametral de cada amostra, utilizou-se a média dos resultados de 3 corpos de prova moldados sob as mesmas condições.

3.3.5.5 *Módulo de Resiliência*

Os solos e as misturas solo-emulsão estudados nesta pesquisa foram submetidos ao ensaio triaxial de carga repetida com o objetivo de se descrever o comportamento resiliente destes materiais. Descreve-se a seguir as peculiaridades inerentes a este ensaio.

3.3.5.5.1 *O Conceito do Ensaio Triaxial de Carga Repetida*

O objetivo de um ensaio tecnológico é simular em laboratório os fenômenos que ocorrem em campo, e assim avaliar o comportamento das variáveis envolvidas no processo. Para isso, deve-se buscar reproduzir as condições que envolvem o fenômeno a ser simulado, como condições de carregamento e geometria, por exemplo.

Em pavimentação, a condição de carregamento apresenta-se como um fator de difícil simulação em ensaios, uma vez que o pavimento é sujeito a cargas de diferentes intensidades e frequências durante sua vida útil. Não obstante, os ensaios tradicionalmente aplicados em pavimentação (resistência à compressão simples e ISC, principalmente) consistem da aplicação de uma carga lenta e crescente, não representando a real condição de carregamento observada em campo.

Neste contexto, os ensaios de carga repetida constituem-se uma tentativa mais aproximada em se descrever a real condição de carregamento de um pavimento. O ensaio de módulo de resiliência, que é um ensaio triaxial de carga repetida, consiste em determinar o comportamento de um material, sob confinamento, após a aplicação de repetidos ciclos de carga e descarga. A aplicação dos repetidos ciclos visa simular as ações do tráfego.

Durante este ensaio, a cada aplicação de carga, o material se deforma. Cessado o carregamento, apenas uma parte dessa deformação se mantém, sendo considerada uma deformação permanente ou plástica (ϵ_p). A deformação que retorna depois de cessado o carregamento é dita deformação retornável ou deformação resiliente (ϵ_r). Com o aumento no número de repetições de carga, as deformações permanentes vão se reduzindo, de forma que após um determinado número de repetições de carga, a deformação é praticamente toda retornável. A este ponto, a deformação, dita resiliente, é considerada elástica. A Figura 3.18 representa as deformações sofridas pelo corpo de prova durante o ensaio de módulo de resiliência.

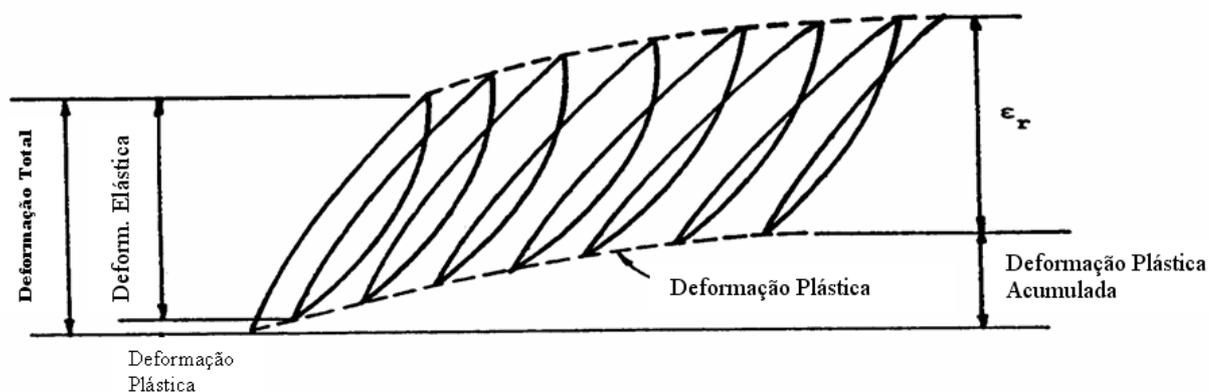


Figura 3.18 - Representação das deformações sofridas pela amostra submetida ao ensaio triaxial de carga repetida (adaptado de Bernucci *et al.*, 2007).

Correlacionando-se as deformações resilientes encontradas nos ensaios com as respectivas tensões que as geraram, tem-se o módulo de resiliência. O módulo de resiliência é, portanto, o módulo elástico obtido em ensaio triaxial de carga repetida, e é dado pela equação (3.6):

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_r} \quad (3.6)$$

Em que:

MR : módulo de resiliência;

σ_d : tensão desvio aplicada repetidamente sobre o corpo de prova;

σ_1 : tensão principal maior;

σ_3 : tensão principal menor, ou tensão de confinamento e

ϵ_r : deformação resiliente.

3.3.5.5.2 Aparelhagem e Procedimentos do Ensaio Triaxial de Carga Repetida

A norma que fixa os procedimentos a serem seguidos para a realização do ensaio triaxial de carga repetida no Brasil é a norma DNER-ME 131/94. O equipamento utilizado para a realização do ensaio de módulo de resiliência consiste de uma prensa triaxial de carga repetida, tal como ilustrada na Figura 3.19, cujo esquema apresenta-se na Figura 3.20.



Figura 3.19 - Prensa triaxial de carga repetida do LMP/UFC.

- A – regulador de pressão para aplicação da tensão-desvio
- B – regulador de pressão para aplicação da tensão confinante
- C – sistema de vácuo
- D – temporizador de controle da frequência e tempo de duração do carregamento (tensão-desvio)
- E – válvula de três vias
- F – amplificador de sinal
- G – oscilógrafo ou microcomputador com monitor e impressora
- 1. cilindro de pressão
- 2. pistão
- 3. conexão
- 4. haste
- 5. cabeçote (top-cap)
- 6. LVDT transdutor de deslocamento
- 7. amostra de solo
- 8. alça de fixação dos LVDTs
- 9. base
- 10. suporte central
- 11. célula triaxial
- 12. estrutura da prensa

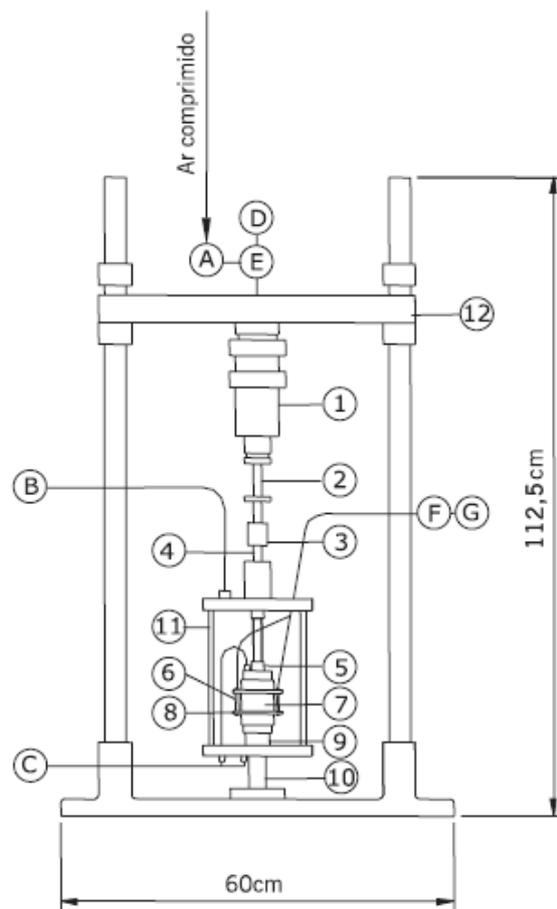


Figura 3.20 - Esquema de um equipamento triaxial de carga repetida (Medina e Motta, 2005).

Para a realização do ensaio triaxial, inicialmente é moldado, segundo as condições especificadas em projeto, um corpo de prova em molde cilíndrico tripartido, cuja relação altura/diâmetro seja igual a 2. Nesta pesquisa, foram moldados corpos de prova de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, à umidade ótima de cada mistura, sob energia intermediária de compactação.

O corpo de prova moldado é então colocado sobre a base do equipamento (identificada pelo número 9 na Figura 3.20), coberto pelo cabeçote (número 5) e vestido com uma membrana de látex. A amostra é então submetida a uma tensão de confinamento, impressa pelo regulador identificado pela letra B. Em seguida são aplicados pulsos de tensão desvio, por meio do regulador de pressão identificado pela letra A. O corpo de prova fica submetido a uma condição de carregamento tal como a apresentada na Figura 3.21.

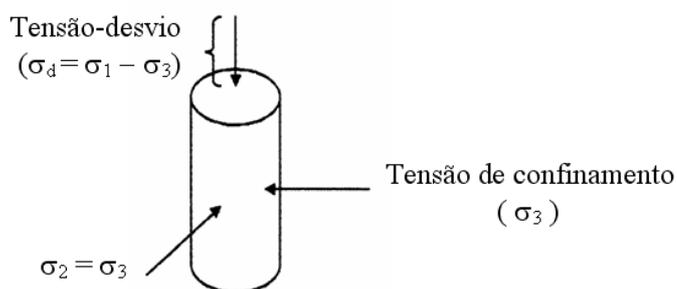


Figura 3.21 - Condição de carregamento de um corpo de prova durante o ensaio de módulo de resiliência (Souza Júnior, 2005).

A aplicação do pulso de tensão é semi-senoidal, com o intuito de reproduzir o efeito da passagem de uma roda sobre o pavimento. O tempo total de um ciclo de carga e descarga é de 1 segundo, sendo 0,1 segundo para a aplicação da carga e 0,9 segundos de repouso, conforme mostra a Figura 3.22.

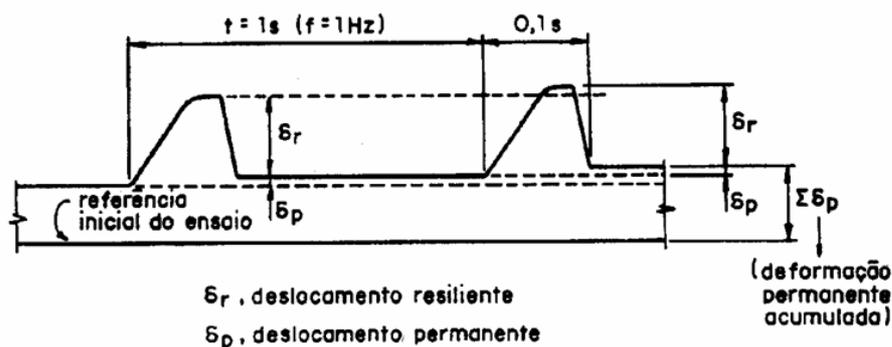


Figura 3.22 - Modelo esquemático de registro dos deslocamentos verticais dos ensaios triaxiais de carga repetida (Medina e Motta, 2005).

O ensaio triaxial dinâmico se divide em duas fases: a de condicionamento e a de ensaio propriamente dito. A fase de condicionamento do corpo de prova é realizada com objetivo de reduzir a influência das deformações plásticas e minimizar os efeitos decorrentes do histórico de tensões da amostra, enquanto no ensaio propriamente dito são realizados os registros das deformações.

A realização total do ensaio consiste da aplicação de diferentes níveis de tensão de confinamento e tensão desvio. O número de ciclos e de etapas das fases de condicionamento e ensaio, bem como os pares de tensão utilizados nesta pesquisa são

os valores em uso na COPPE/UFRJ, conforme aconselham Medina e Motta (2005), exibidos nas Tabelas 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4 - Pares de tensões utilizados na fase de condicionamento (adaptado de Medina e Motta, 2005).

σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	ciclos
0,210	0,210	500
0,690	0,690	500
1,050	3,150	500

Tabela 3.5 - Pares de tensões utilizados no ensaio de MR (adaptado de Medina e Motta, 2005).

σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	ciclos
0,210	0,210	10
	0,420	10
	0,630	10
0,350	0,350	10
	0,700	10
	1,050	10
0,525	0,525	10
	1,050	10
	1,575	10
0,700	0,700	10
	1,400	10
	2,100	10
1,050	1,050	10
	2,100	10
	3,150	10
1,400	1,400	10
	2,800	10
	4,200	10

Ao final do ensaio, é encontrado um valor de módulo para cada nível de tensão. Os resultados do ensaio triaxial de carga repetida consiste de correlações entre os módulos de resiliência e as tensões aplicadas por meio de modelos matemáticos, conforme será apresentando oportunamente no item 4.4.5.1 do presente trabalho.

3.3.6 Resistência ao Desgaste

A análise da resistência ao desgaste constituiu a terceira fase do presente programa experimental. A motivação para a realização desta análise foi de verificar como uma camada de solo-emulsão não revestida tende a se comportar ao sofrer ação direta de tráfego.

Nesta fase, os solos puros e as misturas dos solos com emulsão asfáltica em seus teores ótimos com diferentes condições de distribuição foram submetidos aos ensaios LWT (Loaded Wheel Test) e WTAT (Wet Track Abrasion Test) adaptados.

Os ensaios de LWT e WTAT são utilizados convencionalmente para dosagem de microrevestimento asfáltico a frio e lama asfáltica. Duque Neto (2004) propôs uma série de adaptações desses ensaios com o intuito de verificar a durabilidade da técnica do antipó. Posteriormente, outros pesquisadores aproveitaram essas modificações para a avaliação de outras técnica, como Thuller (2005), que avaliou o tratamento superficial, Miceli Jr (2006) e Soliz (2007) que utilizaram a técnica para avaliação de camadas de solo-emulsão.

Descreve-se a seguir a metodologia utilizada para a realização de cada um desses ensaios.

3.3.6.1 *Loaded Wheel Test (LWT)*

O ensaio LWT original é descrito pela norma NBR 14841 – Determinação de excesso de asfalto e adesão de areia e consiste basicamente em submeter-se um corpo de prova à ação do movimento de uma roda de borracha sob condições de carga e de número de ciclos fixados. Apresenta-se na Figura 3.23 o equipamento utilizado para a realização deste ensaio.



Figura 3.23 - Equipamento de LWT do LMP, durante execução do ensaio.

As modificações propostas por Duque Neto (2004) visavam avaliar o efeito da compactação e as características de deformação da camada de solo quando simulada a ação do tráfego.

A aparelhagem proposta por Duque Neto (2004) é basicamente a mesma aplicada pelo ensaio original, excetuando-se apenas o molde, que deve comportar um corpo de prova de solo e da aparelhagem necessária à compactação da camada. As peculiaridades na aparelhagem são:

- a) o molde composto de chapas de 12,7 mm de espessura compondo uma caixa fechada na base nas dimensões internas de 50,0 mm de altura, 50,8 mm de largura e 381,0 mm de comprimento;
- b) a base de fixação possui 6 parafusos de 70,0 mm de altura e 9,52 mm (3/8") de diâmetro;
- c) o êmbolo de compactação, de área plena, tem dimensões de 40,0 mm de altura, 48,0 mm de largura e 379,0 mm de comprimento;
- d) prensa hidráulica de capacidade mínima de 5 toneladas para fazer a compactação estática do solo.

No âmbito desta pesquisa, foi utilizada uma fôrma diferente da proposta anterior, visando uma melhor adaptação ao equipamento LWT disponível no LMP. A nova proposta consiste de um molde em formato de paralelepípedo de 40 cm de comprimento, 5 cm de largura e 5 cm de altura (dimensões internas), com base desmontável, e de um êmbolo de compactação de área plena de 39,8 cm de comprimento e 4,8 cm de largura, que podem ser vistos na Figura 3.24.

O processo de moldagem dos corpos de prova executado neste trabalho e ilustrado na Figura 3.24, consistiu das seguintes etapas:

1. montagem da fôrma na base, pesagem desse conjunto e aplicação do colarinho;
2. preparação da mistura conforme estabelecido no item 3.1.4 do presente trabalho;
3. divisão da massa misturada em três porções;

4. distribuição da primeira porção ao longo do molde com o auxílio de um funil e regularização da altura da camada solta com uma espátula;
5. colocação do êmbolo de seção plena;
6. programação da velocidade da prensa;
7. compactação estática da camada;
8. verificação da uniformidade da camada com auxílio do paquímetro;
9. repete-se os passos 4 a 8 para a compactação das outras camadas.



Montagem da fôrma



Pesagem da fôrma



Colocação do colarinho



Funil para distribuição do solo



Transferência do solo para o funil



Distribuição do solo



Regularização da altura da camada



Colocação do êmbolo



Programação da prensa



Compactação



Verificação da altura da camada



Pesagem do corpo de prova

Figura 3.24 - Processo de moldagem do corpo de prova para o ensaio LWT adaptado.

Fez-se necessária a compactação do corpo de prova em três camadas, no lugar de duas, como foi sugerido por Duque Neto (2004), para possibilitar a confecção de corpos de prova com distribuição de emulsão em gradiente.

A execução do ensaio, ilustrada na Figura 3.25, conforme descrito por Duque Neto (2004) consiste dos seguintes passos:

1. centralizar o molde de forma que a montagem da roda esteja alinhada com a linha central longitudinal do molde e fixá-lo utilizando os parafusos prisioneiros;
2. determinar a leitura zero com o auxílio do paquímetro de profundidade em um ponto fixo sobre o ponto central do corpo-de-prova, que deverá estar marcado na lateral do molde. Verificar as condições iniciais do corpo-de-prova: presença de exudação, trincamentos e outros possíveis defeitos, registrando-se sempre todas as alterações;
3. abaixar a roda, colocar o peso padrão (56 kg) e zerar o contador de ciclos. Ligar o aparelho e desligar ao completar os estágios de 20, 50, 100, 200, 300, 500 e 1000 ciclos, verificando o afundamento com o auxílio do paquímetro de profundidade e observando possíveis defeitos ocorridos durante a passagem dos ciclos. As observações visuais caracterizam-se pela verificação de defeitos como desgaste, surgimento de lombadas ou arrancamento de placas.



Figura 3.25 - Execução do ensaio LWT adaptado.

A avaliação dos dados do ensaio faz-se determinando os afundamentos em cada estágio de aplicação de carga a partir da diferença da leitura final e inicial. Este ensaio apresenta como resultado um gráfico que relaciona afundamento com número de ciclos.

3.3.6.2 *Wet Track Abrasion Test (WTAT)*

O ensaio WTAT original é descrito pela norma NBR 14746 – Determinação da perda por abrasão úmida e consiste basicamente em submeter um corpo de prova à abrasão gerada pela ação de uma mangueira de borracha a uma velocidade determinada e a um número de ciclos estabelecido. O equipamento utilizado para a realização deste ensaio é apresentado na Figura 3.26.



Figura 3.26 - Equipamento WTAT do LMP, em fase de teste.

Ao sugerir as modificações deste ensaio para aplicação no tratamento antipó, Duque Neto (2004) pretendia avaliar a durabilidade da técnica, da taxa e da emulsão empregada.

Com relação à aparelhagem necessária para a realização deste ensaio, as únicas modificações sugeridas foram as que se relacionam com o corpo de prova e seu processo de moldagem.

O molde proposto é composto por um cilindro de 300 mm de diâmetro por 50 mm de altura. Nesta pesquisa foram utilizadas formas de alumínios nessas dimensões, envoltas em uma cinta metálica reforçada que lhes conferisse uma maior rigidez no momento da compactação e da realização do ensaio, como pode ser observado na Figura 3.27.



Figura 3.27 - Detalhe da fôrma utilizada para o ensaio de WTAT.

A compactação do corpo de prova foi realizada também em 3 camadas, para que fosse possível a confecção de corpos de prova com distribuição de emulsão em gradiente. Em cada camada foram aplicados 73 golpes com o soquete Marshall, para que a compactação ocorresse à energia intermediária. Determinou-se o número de golpes por camada por meio da equação 3.7.

$$E = \frac{P \times h \times N \times n}{V} \quad (3.7)$$

Onde:

E : energia de compactação por unidade de volume;

P : peso do soquete;

h : altura de queda do soquete;

N : número de golpes por camada;

n : número de camadas;

V : volume do solo compactado.

Ao final da compactação o corpo de prova era rasado com o auxílio de uma régua, de modo que sua superfície não apresentasse elevações.

A realização do ensaio seguiu o procedimento indicado por Duque Neto (2004):

1. pesar o conjunto molde + solo antes de começar o ensaio. Pesar o mesmo depois de pincelado com uma vassourinha e retirado o excesso. Determinar 3 alturas no centro do molde com auxílio da régua de aço e do paquímetro de profundidade;
2. encaixar o molde na máquina e travar o cabeçote de abrasão da mangueira de borracha no eixo da máquina. Elevar a plataforma da máquina até que a mangueira de borracha se apóie livremente sobre a superfície da amostra;
3. regular a máquina para 110 rpm (nível 1) e tempo de operação de 300 segundos. Ligar a máquina e esperar o fim do ensaio;
4. retirar o material desprendido após o ensaio com ajuda de uma vassourinha. Pesar o conjunto molde + solo depois do ensaio. Determinar 3 alturas no centro do molde com auxílio da régua de aço e do paquímetro de profundidade nos pontos onde foram feitas as determinações iniciais.

O processo de moldagem e a realização do ensaio estão ilustrados na Figura 3.28. Os resultados obtidos ao final deste ensaio são:

- a) deformação permanente vertical, determinada a partir da diferença entre as leituras das alturas final e inicial;
- b) perda de massa por abrasão, determinada pela diferença entre as massas inicial e final do corpo de prova.



Aspecto da cinta



Montagem da cinta



Compactação



Pesagem após cura



Retirada de excessos



Pesagem



Moldagem cinta



Medidas no centro do CP



Encaixe no equipamento



Elevação da plataforma



Acionamento da máquina



Aspecto do CP após ensaio



Retirada do material solto



Medidas após ensaio



Pesagem após ensaio

Figura 3.28 - Processo de moldagem e realização do ensaio WTAT adaptado.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo contemplou o processo de escolha dos solos a serem estudados do agropólo de Baixo Jaguaribe, bem como os motivos que levaram à escolha do tipo de emulsão a ser empregada. Ainda neste capítulo, foi descrito todo o programa experimental, incluindo caracterização dos materiais empregados, método de dosagem, processo de mistura e procedimentos para a realização dos ensaios laboratoriais.

No Capítulo que se segue serão apresentados e discutidos todos os resultados obtidos a partir da execução da metodologia aqui descrita, vislumbrando a verificação da viabilidade técnica da utilização das misturas solo-emulsão em camadas de base de rodovias da região em estudo.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios executados com as três amostras de solo coletadas no agropólo Baixo Jaguaribe, e com as misturas destes com os diferentes teores de emulsão, seguindo as metodologias descritas no capítulo anterior.

De início, são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos solos, tais como granulometria, densidade real, limites de consistência, classificação TRB e MCT, análise química e mineralógica, assim como os resultados dos ensaios de caracterização da emulsão asfáltica empregada.

Em seguida, são analisadas as variações que os diversos teores de emulsão produzem nas propriedades mecânicas dos solos em estudo, como curvas de compactação, resistência à compressão simples, ISC, resistência à compressão diametral e módulo de resiliência. A partir dessa análise, obtém-se para cada solo o teor de emulsão que conduz aos melhores desempenhos mecânicos.

É também realizada uma análise do comportamento mecânico de corpos de prova de solo-betume, moldados em seu teor ótimo de emulsão, com uma distribuição do ligante em gradiente.

Por fim, são utilizados os resultados dos ensaios adaptados de LWT e WTAT, para a análise da resistência à abrasão e ao desgaste dos corpos de prova de solo-emulsão.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

A caracterização dos solos estudados na presente pesquisa teve por objetivo realizar um levantamento de dados que possibilite a avaliação de como a textura, consistência e composição química dos solos afetam o desempenho da mistura solo-

emulsão. Essa etapa foi dividida em três caracterizações distintas: geotécnica, química e mineralógica.

A caracterização geotécnica teve por finalidade avaliar a textura e consistência de cada solo, verificando se eles se enquadram entre os diversos limites considerados ideais para utilização em misturas solo-betume. Esses limites foram apresentados no item 2.6.2 do Capítulo 2.

O objetivo das caracterizações química e mineralógica foi verificar, entre outros parâmetros, a acidez e a alcalinidade de cada solo, as suas composições químicas e as ações do intemperismo sobre eles, procurando averiguar como essas propriedades se relacionam com o tipo de emulsão escolhido.

4.2.1 Caracterização Geotécnica

A caracterização geotécnica consistiu da realização dos ensaios de densidade real, granulometria conjunta, limite de liquidez e limite de plasticidade, mini-MCV e perda de massa por imersão. Os solos foram também classificados segundo os métodos TRB e MCT.

4.2.1.1 Densidade Real

A densidade real dos solos é uma característica associada à natureza mineralógica, uma vez que depende dos minerais componentes e seus percentuais de ocorrência. Para o caso dos solos em estudo, os valores obtidos são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Densidade Real das amostras de solo em estudo.

Descrição	Amostras		
	Solo A	Solo B	Solo C
Densidade Real	2,605	2,625	2,746

Os valores da densidade real dos solos A e B podem ser considerados baixos, sendo menores que a massa específica do quartzo ($2,65 \text{ g/cm}^3$). Esses baixos valores podem indicar a predominância de minerais secundários, resultantes da fragmentação de rochas pela ação do intemperismo, a presença de minerais mais leves como caulinita e feldspato-K ou, ainda, uma pequena incidência de minerais pesados, como o ferro.

A densidade real do solo C apresentou o maior valor, assemelhando-se aos valores característicos de argilo-minerais (como as montmorilonitas, muscovitas, e cloritas) e do feldspato-Na-Ca. Para melhor visualização, na Tabela 4.2 são apresentados os valores das densidades dos minerais citados.

Tabela 4.2 - Densidade Real de alguns minerais (adaptado de Lambe e Whitman, 1979).

Mineral	Densidade Real
Quartzo	2,65
Feldspato-K	2,54 - 2,57
Feldspato - Na - Ca	2,62 - 2,76
Caulinita	2,61
Muscovita	2,70 - 3,10
Clorita	2,60 - 2,90
Montmorilonita	2,74

4.2.1.2 Granulometria

As curvas granulométricas dos solos A, B e C são apresentadas na Figura 4.1.

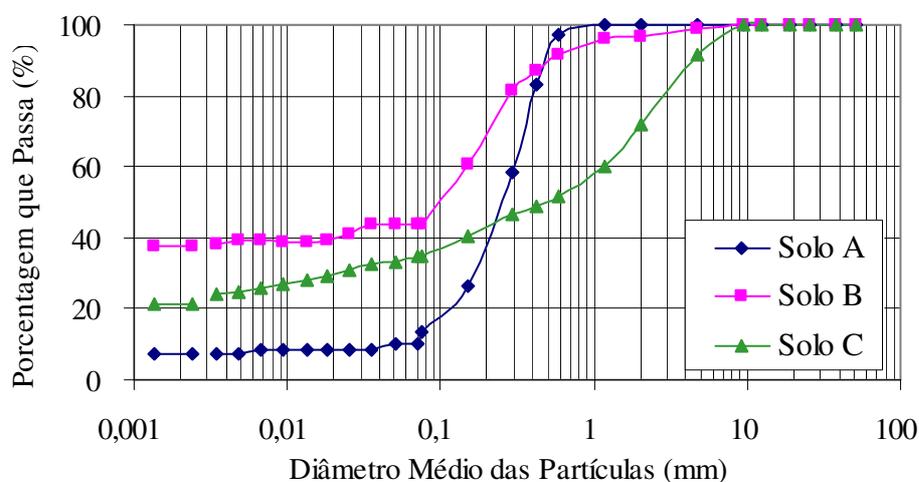


Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos solos estudados.

Baseando-se nas curvas ilustradas na Figura 4.1, observa-se que os três solos apresentam composições texturais bastante distintas. A amostra identificada como A, classificada pedologicamente como uma areia quartzosa, apresenta em sua curva granulométrica uma descontinuidade entre os diâmetros de 0,1 mm e 1mm. Essa descontinuidade foi observada em todos os solos estudados por Barroso (2002) que foram classificados como areia quartzosa.

O Solo B, classificado pedologicamente como um planossolo, tem uma granulometria melhor distribuída que o solo A. Além de ser o solo com o maior teor de argila, a amostra B apresenta uma descontinuidade menos acentuada que a areia quartzosa entre os diâmetros de 0,1 mm e 1 mm.

A amostra C, classificada pedologicamente como um cambissolo, é a que apresenta graduação mais contínua, indicando que sua composição apresenta grãos de todas as dimensões. Este solo é o único a não passar integralmente na peneira de número 10, não podendo a metodologia MCT ser aplicada adequadamente para este caso.

Verificou-se que as amostras estudadas não se enquadram em nenhuma das faixas granulométricas definidas pelo DNIT. Apenas o solo C apresenta parte de sua granulometria enquadrada nas faixas E e F.

A Tabela 4.3 apresenta o resumo da granulometria dos solos em estudo, juntamente com os limites granulométricos recomendados por alguns autores (citados na Tabela 4.3) para solos a serem estabilizados com materiais betuminosos. Essas recomendações foram apresentadas previamente neste trabalho, no item 2.4.3.1 do Capítulo 2.

Tabela 4.3 - Resumo da granulometria dos solos e dos limites recomendados para estabilização betuminosa.

Peneira	Solo A	Solo B	Solo C	TRB (1946)	Yoder e Witzak (1975)			DER-SP (1991)	ABEDA (2001)	ASTM (2006)
					Areias	Pedregulhos	Finos			
25 mm	100	100	100	-	-	-	-	80 a 100	-	-
4,8 mm	100	99	91	> 50	-	-	-	50 a 100	-	-
2,0 mm	100	97	72	-	-	-	-	35 a 100	-	-
0,42 mm	83	87	49	35 a 100	-	-	-	15 a 75	-	-
0,075mm	14	44	35	10 a 50	<25	<15	<35	0 a 35	<20	<25

Com base nessas recomendações, verifica-se que o solo A obedece aos requisitos granulométricos de quase todos os autores, excetuando-se apenas os limites estabelecidos pelo DER-SP (este solo apresenta mais de 75% passando na peneira 0,42mm).

O solo B enquadrou-se apenas nos requisitos arbitrados pela HRB, desobedecendo a todas as outras recomendações. Isso ocorreu devido a quantidade de material passada na peneira de número 200.

O solo C, por sua vez, não seria utilizado em misturas solo-emulsão se os critérios de seleção de material fossem os recomendados pela ABEDA ou pela ASTM. A explicação também reside no fato desse solo possuir quantidade de fração fina fora dos limites aceitáveis.

4.2.1.3 Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade

Os resultados dos ensaios de limite de liquidez e índice de plasticidade dos solos estudados são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Valores dos limites de liquidez e índices de plasticidade dos solos estudados.

Descrição	Amostra		
	Solo A	Solo B	Solo C
LL (%)	NL	22	30
IP (%)	NP	7	4

Observando esses valores verificou-se que o único solo enquadrado nos parâmetros de consistência exigidos para execução de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários é a amostra A (LL < 25% e IP < 6%).

Com relação às recomendações de consistência para estabilização betuminosa, o único solo que não atendeu a todos os requisitos foi o solo B (ver item 2.4.3.1 do Capítulo 2). Este solo apresenta IP de 7%, ultrapassando o máximo de 6% recomendado pelo DER-SP.

Entretanto, sabe-se que os ensaios para determinação dos limites de Atterberg são de difícil repetibilidade e seus resultados dependem da habilidade do operador. Logo, esse valor de 7% para o índice de plasticidade da amostra de solo B poderia vir a ser reduzido e enquadrado nos padrões determinados, se outro operador realizasse o ensaio.

4.2.1.4 Classificação TRB

De posse dos resultados dos ensaios de granulometria e limites de consistência, as amostras de solo foram classificadas segundo a classificação TRB. As classes TRB dos solos estudados são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Classificação TRB das amostras em estudo.

Amostra	Solo A	Solo B	Solo C
Classe	A-2-4	A-4	A-4

Vale destacar que o solo C apresenta 35% de material passando na peneira de 0,075mm. Esse valor é exatamente o limite que separa solos granulares de solos finos na classificação TRB. Ainda que os solos A e C possam ser enquadrados na mesma classe (A-2-4), eles são completamente distintos em termos de textura, consistência, trabalhabilidade e comportamento mecânico. O solo C apresenta padrão de comportamento muito parecido com solos classificados como A-4 e, por esse motivo, essa amostra foi enquadrada nesta classe.

4.2.1.5 Classificação MCT

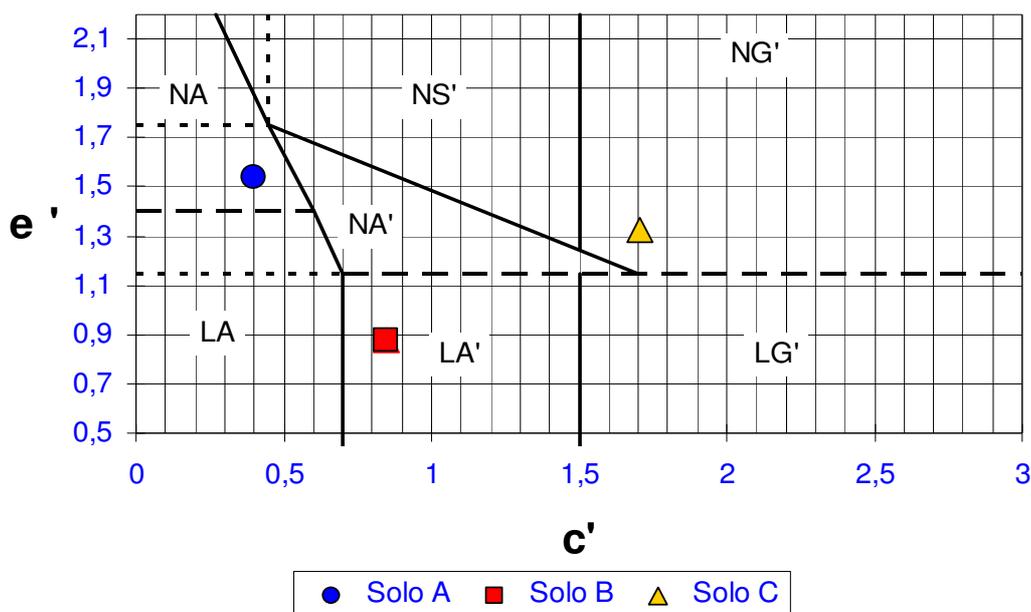
De posse dos resultados dos ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão as amostras de solo foram classificadas segundo a metodologia MCT. A realização destes ensaios teve como principal objetivo verificar se os solos em estudo apresentavam comportamento laterítico.

Cabe ressaltar que esta classificação se aplica aos solos finos (mais de 95% passante na peneira nº 10), o que não é caso do solo C. Ainda assim, este solo foi submetido aos ensaios com a finalidade de verificar se seus finos sofreram processo de laterização. Para tanto, o solo C foi submetido ao ensaio com uma amostra composta apenas pelo material passante na peneira de 2 mm.

Na Tabela 4.6, são apresentados os coeficientes c' , d' e P_i e o índice e' utilizados para obtenção da classificação MCT, e a Figura 4.2 mostra a localização das amostras no ábaco de classificação.

Tabela 4.6 - Parâmetros c' , d' , e' e P_i da classificação MCT das amostras estudadas.

Amostra	Solo A	Solo B	Solo C
c'	0,55	0,85	1,71
d'	36,36	86,22	31,3
e'	1,54	0,88	1,33
P_i (%)	308	45	170
Classe	NA	LA'	NG'

**Figura 4.2** - Localização das amostras no ábaco de classificação MCT.

4.2.2 Caracterização Química

A caracterização química realizada neste trabalho teve por objetivo verificar a composição dos solos e os indícios da ação do intemperismo sobre eles, além de avaliar a influência da constituição dos solos na relação solo-betume.

Essa caracterização constou da determinação dos macronutrientes (Ca, Mg, K, Na Al e P), do teor de matéria orgânica (MO), da determinação do pH (em água e em KCl), da soma dos cátions trocáveis (S), da capacidade de troca catiônica (CTC), da saturação de Alumínio (%Al) e da saturação de bases (%V). As amostras foram ainda submetidas à fluorescência de Raios X com a finalidade de verificar quais os óxidos predominantes nos três solos. Os dados desses ensaios são apresentados nas Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9.

Tabela 4.7 - Macronutrientes presentes nos solos.

Amostra	Ca ²⁺ *	Mg ²⁺ *	Na ⁺ *	K ⁺ *	H ⁺ + Al ³⁺ *	Al ³⁺ *	P (mg/Kg)	C (g/Kg)	N (g/Kg)
Solo A	1	0,9	0,04	0,05	0,16	0	4	1,14	0,13
Solo B	1,6	1,4	0,08	0,26	2,64	1	2	3,12	0,32
Solo C	5,7	2,4	0,03	0,32	0,16	0	2	3,48	0,35

* Valores em cmol_c/kg

Tabela 4.8 - Propriedades químicas dos solos em estudo.

Amostra	pH			MO	Valor Ref.	S	CTC	%Al	%V
	água	KCl	ΔpH	(g/kg)	Orgânico	(cmol _c /kg)	(cmol _c /kg)	(%)	(%)
Solo A	6,9	5,4	-1,5	1,97	8,469	2	2,2	0	92
Solo B	4,5	3,7	-0,8	5,38	10,613	3,3	6	23	56
Solo C	6,9	5,6	-1,3	6	9,675	8,5	8,9	0	98

Tabela 4.9 - Resultados da fluorescência de Raios X.

Óxido	Percentual em massa		
	Solo A	Solo B	Solo C
Al ₂ O ₃	25,99	25,25	34,27
SiO ₂	58,78	63,10	47,34
K ₂ O	8,62	3,11	1,23
CaO	1,21	0,40	0,64
TiO ₂	0,94	1,73	2,51
Fe ₂ O ₃	3,92	5,74	12,98
Outros	0,54	0,67	1,03

Para a avaliação da caracterização química foram enfatizados os resultados de pH, capacidade de troca catiônica e os percentuais de óxido ferro, óxido de alumínio e sílica, encontrados por meio da fluorescência de Raios X.

4.2.2.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)

De acordo com Costa (2004), a carga elétrica das partículas coloidais varia com o pH do solo. Por este motivo, o potencial hidrogeniônico influi consideravelmente nos fenômenos de adsorção e trocas iônicas.

Este autor afirma que a principal causa de acidez do solo é a perda de bases arrastadas por águas de infiltração. Quando não há arrastamento das bases por águas de

infiltração, verifica-se a alcalinidade e um elevado grau de saturação do complexo de troca do solo.

Valores menores de pH indicam a presença de ácidos livres e valores maiores indicam a presença de solos salinos ou calcários. Segundo Jacintho (2005), o solo pode ser:

- Ácido: $\text{pH} < 5,5$;
- Moderadamente ácido: $5,5 < \text{pH} < 6,4$;
- Praticamente neutro: $6,5 < \text{pH} < 6,9$;
- Neutro: $\text{pH} = 7,0$;
- Alcalino: $\text{pH} > 7,0$.

De acordo com esses valores, os solos A e C são praticamente neutros, indicando que ambos sofreram pouco arrastamento de bases por águas de infiltração e pequena presença de sais solúveis em sua composição. Buol *et al.* (1980) afirmaram que esse valor de pH (entre 6,5 e 8,0) indica grande saturação de bases no solo (%V), o que pode ser confirmado pelos resultados do ensaio: solo A apresenta 92% de saturação de bases e o solo C apresenta 98% de saturação de bases.

O solo B por sua vez mostrou-se um solo ácido, indicando arrastamento de bases por infiltração. Esse fato foi confirmado pelo valor de saturação de bases, uma vez que este solo apresentou apenas 56%, valor este bem menor que os apresentados pelos solos A e C. Buol *et al.* (1980) apontam, ainda, o valor de pH desta amostra (entre 4,5 e 5,8) como indicativo da presença de alumínio trocável (%Al), o que também foi observado nos resultados da caracterização: o solo B apresenta 23% de saturação de alumínio.

Com os valores de pH em água e em KCl é possível a determinação do ΔpH . Esse parâmetro é dado pela diferença aritmética entre os valores de pH determinados em KCl e em água: $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$. Segundo Kiehl (1979), um valor de ΔpH negativo indica que ocorre na amostra predominância de argilas silicatadas, enquanto um ΔpH positivo está relacionado com predomínio de óxidos de ferro e alumínio.

O ΔpH pode ser analisado em conjunto com os resultados da fluorescência de Raios X. O valor do ΔpH dos três solos é negativo, indicando predominância de argilas silicatadas. De fato, pela fluorescência pode-se perceber a predominância dos óxidos de silício sobre os óxidos de ferro e alumínio. Tal resultado é adequado para os solos A e C, apontados pela classificação MCT como solos não lateríticos.

Esta análise, no entanto, entra em desacordo com a classificação MCT para o solo B, apontado como LA' (laterítico arenoso). Do valor negativo do ΔpH para este solo infere-se a não predominância dos óxidos de ferro e alumínio, o que ficou comprovado por meio da fluorescência de Raios X.

Jacinto (2005) ao analisar o ΔpH de seus solos verificou que uma de suas amostras, classificada como LA' pela metodologia MCT, apresentou um valor negativo de ΔpH . Esta autora suspeitou que o elevado teor de areia presente na amostra de solo pudesse colocar em posição secundária o efeito da presença dos óxidos de ferro e alumínio. Em outras palavras, o alto teor de areia neste solo seria responsável por uma maior concentração de sílica, o que se refletiria no valor negativo do ΔpH , mas que não anularia a influência dos óxidos de ferro e alumínio sobre o comportamento laterítico da amostra.

É importante levar em conta também, na avaliação desta discrepância, que a metodologia MCT foi definida para os solos do estado de São Paulo. Assim, sendo as diversas regiões do país sujeitas às diferentes condições climáticas e geológicas, é possível que a aplicabilidade da metodologia MCT seja limitada por diversos fatores, sobretudo em regiões de clima semi-árido, como é o caso da região em estudo desta pesquisa.

4.2.2.2 Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

A capacidade de troca catiônica pode ser definida, segundo Buol *et al.* (1980) como a capacidade de um solo de absorver e reter cátions e de trocar alguns tipos desse íon em reações químicas reversíveis. Black *et al.* (1965) definem essa propriedade como sendo a soma dos cátions trocáveis de um solo. Buol *et al.* (1980) enumeram algumas interpretações que podem ser realizadas a partir dos dados de CTC, sendo elas descritas a seguir.

A. Os valores de CTC podem indicar os tipos de argilo-minerais presentes no solo. A Tabela 4.10 apresenta os valores de capacidade de troca catiônica de alguns argilo-minerais.

Tabela 4.10 - Valores de CTC de alguns argilominerías (Santos, 1975 *apud* Jacintho, 2005).

Argilo-mineral	CTC (cmol _c /kg)
Caulinita	3 a 15
Haloisita-2H ₂ O	5 a 10
Endeilita ou haloisita-4H ₂ O	10 a 40
Montmorilonita	80 a 150
Ilita	10 a 40
Vermiculita	100 a 150
Clorita	10 a 40
Sepiolita-paligorsquita	20 a 30

B. A CTC pode inferir no grau de intemperismo de um solo. Altos valores de CTC indicam solos pouco intemperizados, enquanto baixos valores indicam solos mais intemperizados. É sugerido um valor de referência de 10 cmol_c/kg para distinguir valores altos de CTC de valores baixos de CTC.

C. Solos minerais com CTC maiores que 20 cmol_c/kg podem apresentar significativo teor de montmorilonita, o que indica solos expansivos.

Baseando-se nestas inferências, verifica-se que os três solos são considerados intemperizados e não apresentam teores significantes de montmorilonita. É possível que os solos B e C apresentem caulinita e haloisita.

Couto (2008) afirma que a atividade das argilas (Tr) pode ser inferida pela CTC e pelo percentual das argilas no solo por meio da equação 4.1. Solos com valores de Tr iguais ou maiores que 27 cmol_c/kg indicam alta atividade de argilas e valores inferiores a este indicam baixa atividade. A Tabela 4.11 apresenta os valores calculados de Tr para os três solos estudados.

$$Tr = 100 \times \left(\frac{CTC}{\%ARGILA} \right) \quad (4.1)$$

Tabela 4.11 - Valores de Tr para os solos estudados.

Amostra	Solo A	Solo B	Solo C
Tr (cmol _c /kg)	31,43	15,39	35,60

Com base nesses valores, pode-se afirmar que as argilas dos solos A e C têm atividade alta e as argilas do solo B têm atividade baixa, em acordo com os resultados da classificação MCT.

4.2.2.3 Relação Sílica-Alumina e Sílica-Sesquióxidos

Baptista *et al.* (1998) afirmam que os solos altamente intemperizados caracterizam-se pela remoção de sílica e bases do perfil e posterior acúmulo de alumínio. De acordo com Costa (1973) e Baptista *et al.* (1998), a razão entre os teores de sílica e alumina (K_i), e a razão entre os teores de sílica e sesquióxidos (K_r) podem ser utilizadas como indicadores da evolução dos solos. A relação sílica-alumina é dada pela expressão (4.2), enquanto a relação sílica sesquióxidos é dada pela expressão (4.3), conforme as normas da EMBRAPA (1997):

$$K_i = \frac{\%(SiO_2) \times 1,7}{\%(Al_2O_3)} \quad (4.2)$$

$$K_r = \frac{\frac{\%(SiO_2)}{0,60}}{\frac{\%(Al_2O_3)}{1,02} + \frac{\%(Fe_2O_3)}{1,60}} \quad (4.3)$$

Quanto menores forem os valores de K_i e K_r , mais intemperizado será o solo, pois menor será a concentração de sílica e maior a concentração de óxidos de ferro e alumínio. Em outras palavras, baixos valores de K_i e K_r indicam que ocorreu remoção parcial e/ou total da sílica e posterior concentração do ferro e do alumínio. Valores de K_i e K_r menores que 2 indicam alto grau de intemperismo.

Kézdi (1979) *apud* Miceli Jr (2006) afirma que os solos que apresentam a relação sílica-sesquióxidos (K_r) acima de 2 devem ser estabilizados com sais de amina, presentes apenas nas emulsões catiônicas. Ainda segundo este autor, quanto mais sílica um solo contiver, maior a quantidade de emulsão necessária para uma estabilização

satisfatória, e quanto maior a quantidade de compostos de ferro e alumínio, mais fácil será a estabilização (ver item 2.6.1, no Capítulo 2).

Os valores de K_i e K_r para os solos em estudo foram calculados a partir dos resultados da fluorescência de Raios X e encontram-se na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Valores de K_i para os solos A, B e C.

Amostra	Solo A	Solo B	Solo C
K_i	3,86	4,25	2,35
K_r	3,51	3,71	1,89

Os valores apresentados indicam que os solos A e B sofreram pouco intemperismo, enquanto o solo C apresenta maior grau de evolução. Os resultados indicam ainda que os solos A e B precisam de mais emulsão que o solo C para uma estabilização satisfatória.

4.2.3 Análise Mineralógica

A análise mineralógica dos solos foi realizada por meio de difratometria de Raios X, a uma velocidade de varredura de 2° por minuto. As Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 representam os difratogramas para os solos A, B e C, respectivamente.

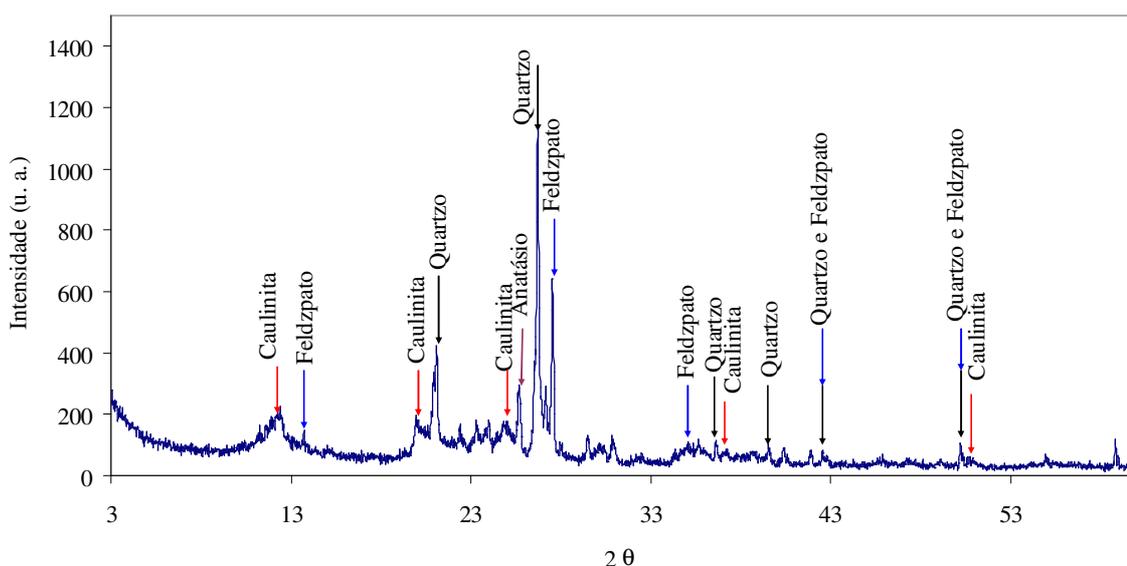


Figura 4.3 - Difratograma do solo A.

Os principais minerais identificados para a amostra A foram o quartzo, a caulinita, o feldspato e o anatásio. A presença do quartzo, do feldspato e do anatásio foi identificada por meio de picos bem definidos, estreitos, simétricos e intensos, o que indica material com estrutura cristalina bem definida e grande percentual desses minerais na amostra. A caulinita foi identificada por meio de picos pouco intensos e largos, o que indica a sua pequena participação na constituição da amostra. Estes resultados são compatíveis com as indicações do ensaio de densidade real (ver item 4.2.1.1).

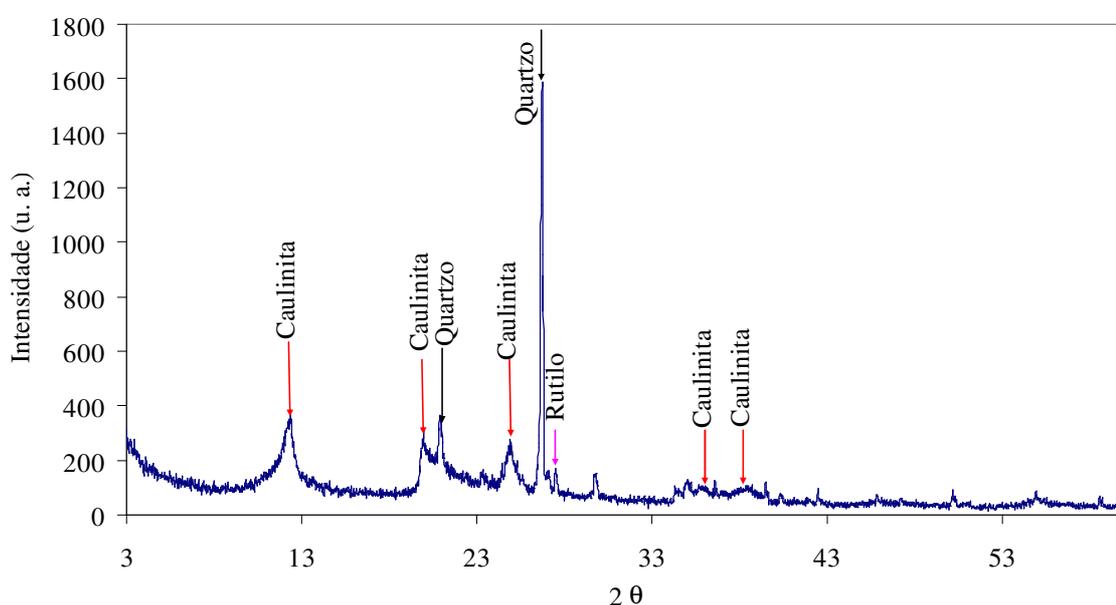


Figura 4.4 - Difratograma do solo B.

Os minerais identificados no solo B foram: o quartzo, a caulinita e o rutilo. Os picos que identificam o quartzo são estreitos, intensos e bem definidos, o que indica a grande participação deste mineral na composição da amostra. Embora os picos referentes à caulinita sejam ainda menos intensos que os picos do quartzo, observa-se que os mesmos são um pouco melhor definidos do que na amostra A, indicando que o solo B apresenta um pouco mais de caulinita em sua constituição que a areia quartzosa (amostra A). Observa-se compatibilidade deste resultado com as indicações do ensaio de densidade real e também da capacidade de troca catiônica, que indicou a presença de caulinita ou haloisita na constituição do solo B.

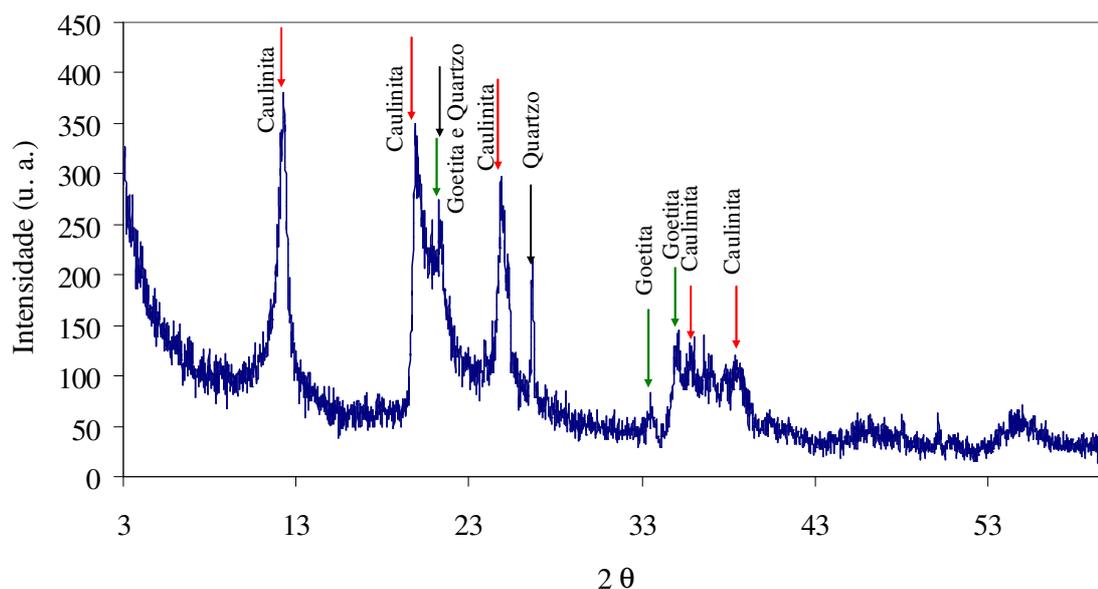


Figura 4.5 - Difratograma do solo C.

Já na amostra C foram identificados quartzo (setas pretas), caulinita (setas vermelhas) e goetita (setas verdes). Para esta amostra, os picos que apresentaram melhor definição e maior intensidade foram os referentes às caulinitas, indicando a predominância deste mineral sobre os demais. A goethita também apresentou picos estreitos, simétricos e mais intensos que os referentes ao quartzo. Verificou-se, portanto, a predominância de caulinita e de goethita nesta amostra.

A análise mineralógica é compatível com a análise química, uma vez que o solo que apresentou predominância de caulinita e goethita na difratometria de Raios X (solo C) foi o mesmo que apresentou os maiores teores de ferro e alumínio na fluorescência de Raios X.

Jacinto (2005) afirma que a caulinita em geral é encontrada em solos maduros, ou seja, que sofreram algum tipo de intemperismo. Desta forma, a predominância da caulinita no solo C é um indicativo de que este solo é o mais intemperizado entre as amostras estudadas. Esse fato é confirmado pela razão sílica-sesquióxidos, onde os valores de Kr do solo C são menores que 2, indicando um solo que sofreu alto grau de intemperismo, enquanto os solos A e B apresentaram Ki e Kr maiores que 2, indicando solos menos evoluídos que o solo C.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA EMULSÃO ASFÁLTICA

A emulsão asfáltica utilizada no presente trabalho foi uma emulsão catiônica de ruptura lenta (RL-1C) cedida pela empresa Asfaltos Nordeste. A Tabela 4.13 apresenta as características desta emulsão, bem como os valores de referência para cada propriedade.

Tabela 4.13 - Caracterização da emulsão asfáltica.

Ensaio	Especificação	Resultado
Viscosidade Saybolt-Furol a 50° C	Máx 70	21
Peneiração (retido na peneira nº 20) (%)	Máx 0,1	0,01
Resíduo (% em peso)	Mín 60,0	60,2
Emulsão asfáltica - carga da partícula	Positiva	positiva

Observando-se a Tabela 4.13, verifica-se que o resultado do ensaio de resíduo por evaporação indica que a emulsão utilizada contém, em peso, 39,8% de água.

4.4 ANÁLISE MECÂNICA

Para a realização da análise do comportamento mecânico das misturas solo-emulsão, os solos e suas misturas com emulsão asfáltica foram submetidos aos ensaios de compactação, resistência à compressão simples, Índice de Suporte Califórnia, resistência à compressão diametral e módulo de resiliência.

O intuito deste estudo não foi apenas investigar as alterações no comportamento dos solos decorrente da adição dos diversos teores de emulsão e dos diversos tempos de cura, mas foi também uma tentativa de descobrir o teor ótimo de emulsão para cada solo.

Nos itens que se seguem são discutidos os resultados dos ensaios.

4.4.1 Ensaios de Compactação

Os ensaios de compactação nas misturas de solo-emulsão tiveram o objetivo de observar eventuais modificações impostas pela adição de emulsão na umidade ótima, na massa específica aparente seca máxima e na forma das curvas de compactação dos solos em estudo.

Os teores de umidade dos ensaios de compactação foram obtidos por meio da razão entre a massa dos fluídos (água de dispersão + água de diluição + água contida na emulsão) e a massa de sólidos da mistura (solo + betume).

Durante a execução dos ensaios observou-se que em solos com baixos teores de umidade ocorre a ruptura prematura da emulsão, dificultando o processo de mistura. À medida que se aumenta o teor de umidade, a água auxilia na distribuição da emulsão e torna possível a obtenção de misturas mais homogêneas, conforme pode ser observado na Figura 4.6. Nesta figura são apresentados os corpos de prova resultantes do ensaio de compactação da mistura Solo B + 5% de emulsão asfáltica, referentes aos terceiro ponto (umidade ótima), quarto e quinto pontos (ramo úmido) da curva de compactação. Essa fenômeno da ruptura prematura da emulsão em misturas mais secas foi também observado por Lucena *et al.* (1982).

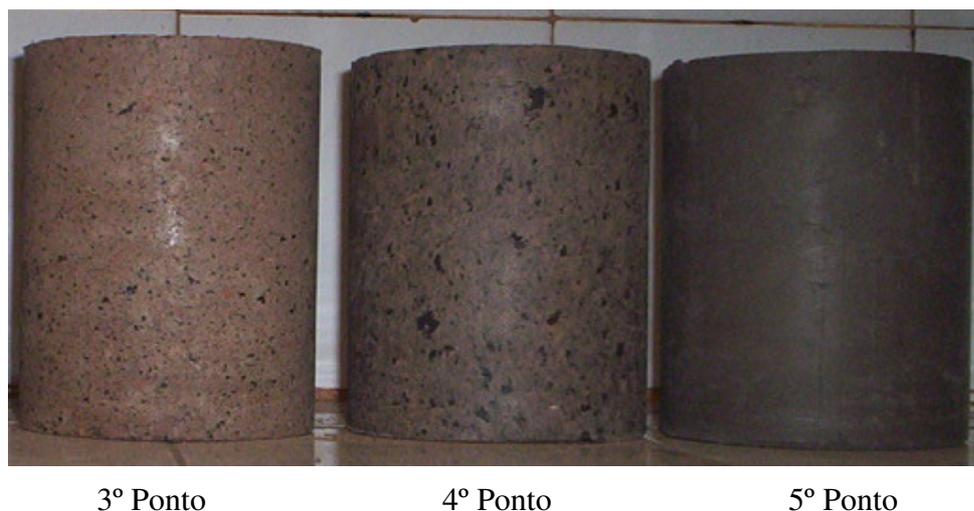


Figura 4.6 - Corpos de prova resultantes do ensaio de compactação da mistura solo B + 5% de emulsão.

Os efeitos da estabilização betuminosa em cada um dos solos em estudo são avaliados individualmente e, em seguida, são discutidos os efeitos da estabilização nos ensaios de Proctor de um modo geral.

4.4.1.1 Solo A

A Figura 4.7 apresenta as curvas de compactação do solo A puro e das misturas deste com 2%, 5% e 8% de emulsão asfáltica.

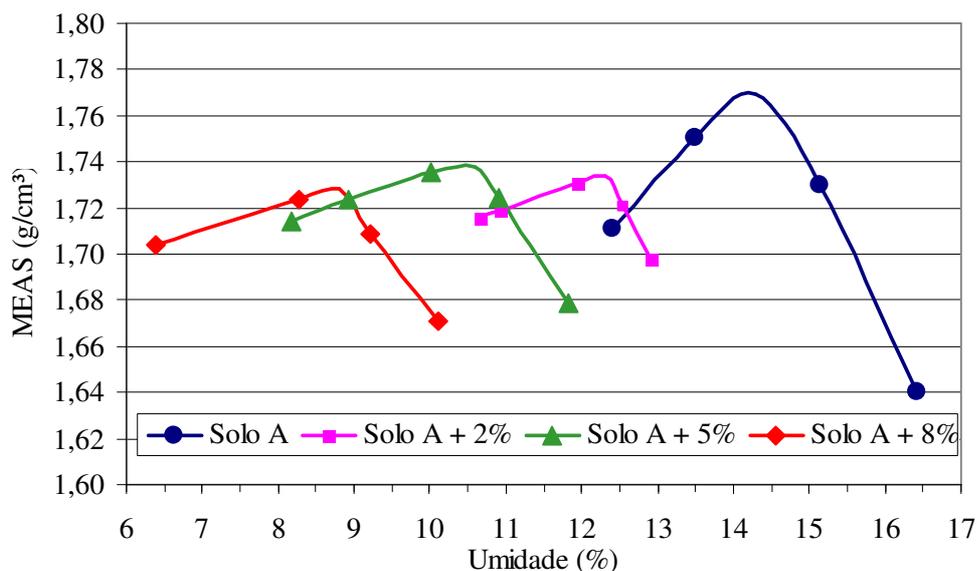


Figura 4.7 - Curvas de compactação do Solo A e suas misturas com emulsão.

Observando a Figura 4.7, pode-se verificar que a curva de compactação varia de acordo com o teor de emulsão. Para esta amostra, à medida que se aumenta o teor de emulsão, a umidade ótima da mistura decresce, de forma que a umidade ótima para mistura do solo A + 8% de emulsão é cerca de 5 pontos percentuais mais baixa que a referente ao solo A puro.

Esta observação se contrapõe às conclusões encontradas na bibliografia. A maioria dos pesquisadores chegou à conclusão de que a umidade ótima das misturas é bastante próxima da umidade ótima do solo natural. Lucena *et al.* (1982), Araújo *et al.* (1983) e Momm (1983) observaram que há uma leve redução na umidade ótima das misturas a partir da aplicação de emulsão, mas que essa variação é geralmente menor que 1%, podendo ser desconsiderada na maioria dos casos. Não foram encontrados relatos de variações de umidade tão consideráveis quanto a variação verificada para este solo A.

No que se refere à massa específica aparente seca máxima, observou-se que as misturas apresentaram densidades máximas próximas da densidade máxima do solo puro. Essa variação é bastante pequena, podendo ser considerado que a emulsão asfáltica praticamente não modificou essa propriedade do solo A.

4.4.1.2 Solo B

A Figura 4.8 apresenta as curvas de compactação do solo B puro e das misturas deste com 2%, 5% e 8% de emulsão asfáltica.

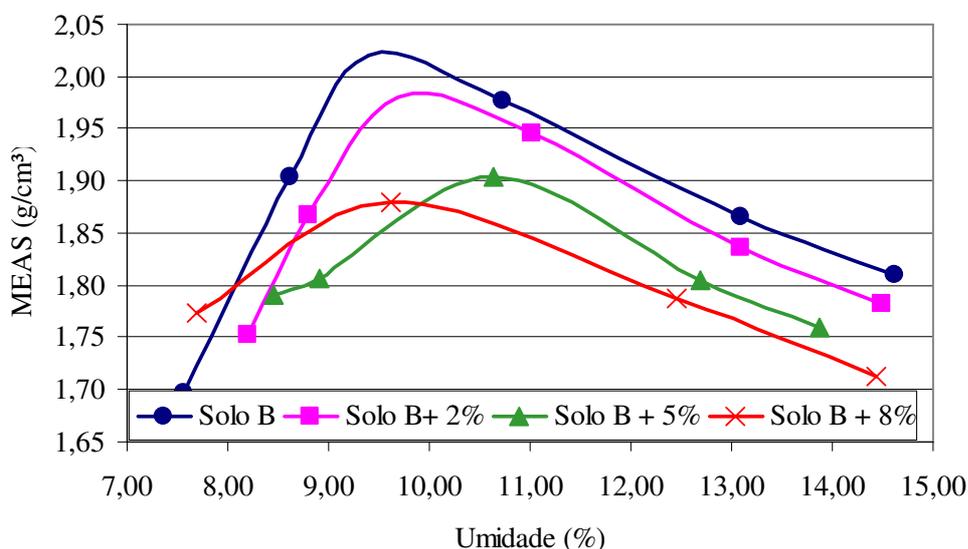


Figura 4.8 - Curvas de compactação do solo B e suas misturas com emulsão.

Para o solo B, o fenômeno observado foi diferente do solo A. O aumento do teor de emulsão nas misturas com o solo B resultaram em decréscimo na massa específica aparente seca máxima, enquanto praticamente não se observou variação na umidade ótima das misturas.

Esses resultados estão em harmonia com as conclusões de alguns autores: a densidade máxima das misturas de solo-betume diminui com o aumento do teor de asfalto (Road Research Laboratory, 1951; Ingles e Metcalf, 1972; Ferreira, 1980) e a umidade das misturas solo-emulsão varia menos de 1% com relação à umidade ótima dos solos puros (Lucena *et al.*, 1982; Araújo *et al.*, 1983; Momm, 1983; Jacintho, 2005).

4.4.1.3 Solo C

A Figura 4.9 apresenta as curvas de compactação do solo C puro e das misturas deste com 2%, 5% e 8% de emulsão asfáltica.

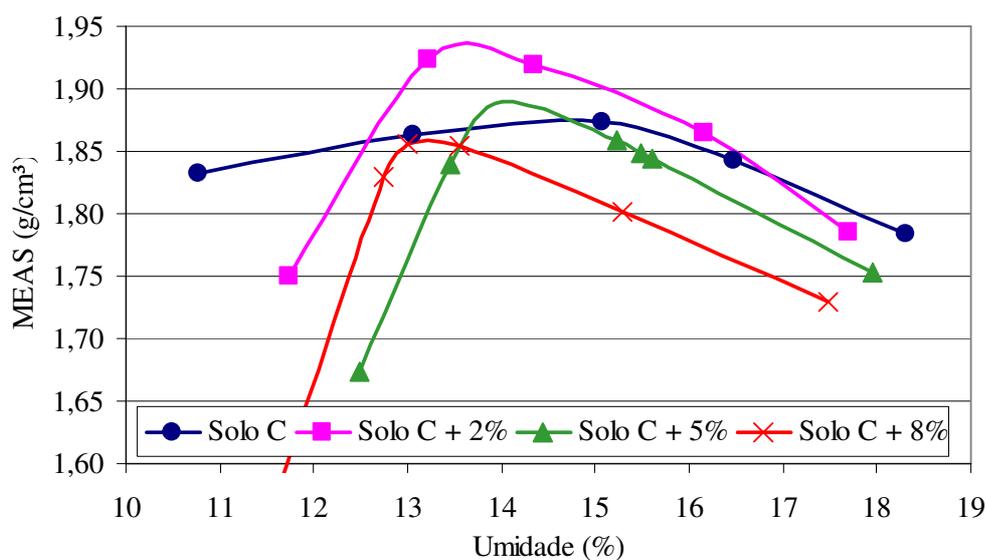


Figura 4.9 - Curvas de compactação solo C e suas misturas com emulsão.

Observando as curvas de compactação referentes ao solo C e suas misturas, nota-se que essas curvas tendem a ficar mais agudas em torno da umidade ótima à medida que se aumenta o teor de emulsão, apresentando-se mais fechadas. Por esta razão, o controle de compactação desse material exige uma maior atenção, uma vez que pequenas variações na umidade conduzirão a maiores alterações na massa específica da mistura.

Tal fenômeno foi também observado por Jacintho (2005), que concluiu que as alterações na forma da curva de compactação indicam que a adição de emulsão implica em modificações na estrutura do solo.

Para o solo C, observou-se também que o acréscimo de emulsão asfáltica propicia um aumento de densidade para o teor de emulsão de 2%, a partir do qual ocorrem gradativos decréscimos nos valores dessa propriedade. Esse fenômeno foi também observado por outros pesquisadores em alguns tipos de solos, como Momm (1983), Jacintho (2005) e Lucena *et al.* (1982). Momm (1983) e Lucena *et al.* (1982) consideraram esse fenômeno como o padrão de comportamento para a maioria das misturas. Estes últimos pesquisadores chegaram também a considerar como exceções solos que apresentem uma diminuição contínua de densidade com o aumento do teor emulsão.

4.4.1.4 Efeitos da Estabilização Betuminosa na Compactação dos Solos Estudados

Para uma melhor visualização das variações da massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima a partir da adição de emulsão foram elaboradas as Figuras 4.10 e 4.11. Na Figura 4.10 são mostradas as relações entre os percentuais de emulsão utilizados e a massa específica aparente seca máxima para os três solos em estudo. Na Figura 4.11 são mostradas as relações entre os teores de emulsão e a umidade ótima da mistura.

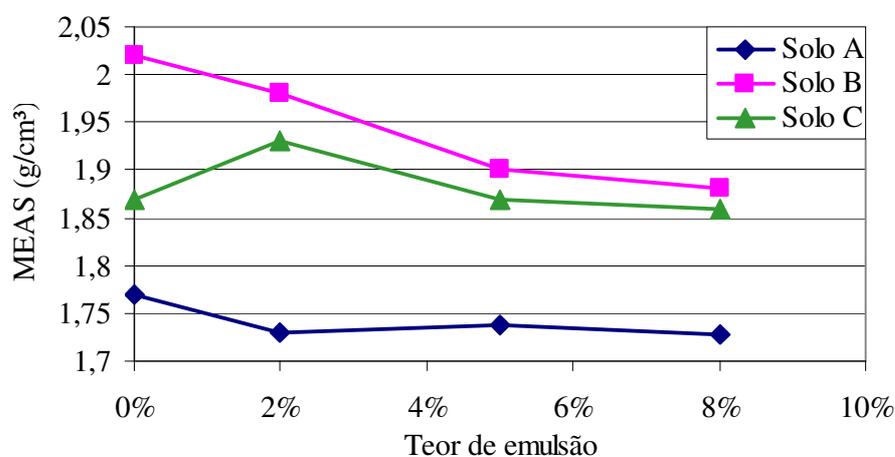


Figura 4.10 - Relação entre teor de emulsão e densidade máxima das misturas.

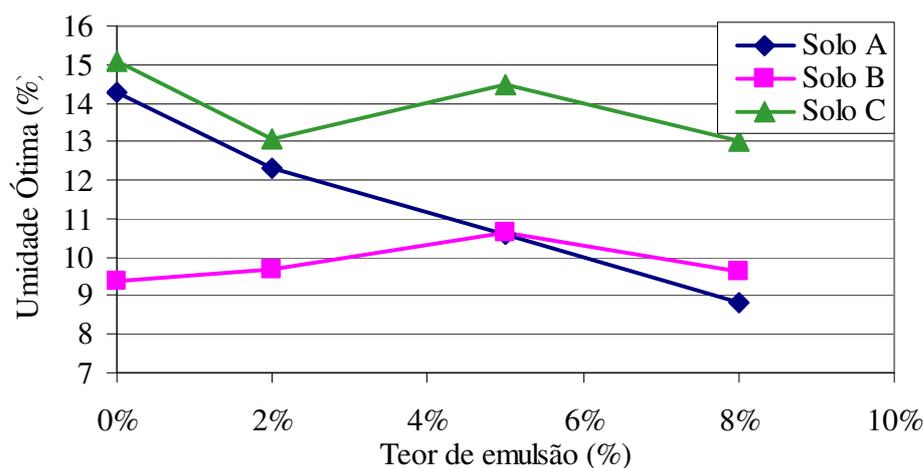


Figura 4.11 - Relação entre teor de emulsão e umidade ótima das misturas.

Os solos estudados nessa pesquisa não indicaram um mesmo padrão de variação das massas específicas aparentes secas máximas, nem das umidades ótimas, com o aumento do teor de emulsão aplicada.

Percebeu-se na literatura que não existe consenso entre os diversos autores sobre o padrão de comportamento das curvas de compactação dos solos a partir da adição de emulsão. O Road Research Laboratory (1951), Ingles e Metcalf (1972) e Ferreira (1980) indicam que a densidade máxima das misturas de solo-betume diminui com o aumento do teor de asfalto. Por outro lado, Lucena *et al.* (1982) e Momm (1983) indicam haver um teor de emulsão para o qual se observa um aumento na densidade máxima, a partir do qual a densidade começa a sofrer reduções.

Em uma primeira tentativa de explicar esse mecanismo, Jacintho (2005) comenta que dois efeitos se contrapõem influenciando a massa específica seca das misturas de solo-emulsão: o teor de betume, devido a sua menor densidade, atuaria gerando a redução da massa específica, enquanto o mesmo betume atuaria reduzindo a sucção e, portanto, facilitando a compactação. No entanto, existe ainda uma dificuldade em mensurar quando um desses efeitos se sobrepõe ao outro.

Os fenômenos observados nos ensaios de compactação desta pesquisa e os mais diversos resultados encontrados na literatura conduzem à seguinte conclusão: no que se refere aos parâmetros mensurados pelo ensaio de Proctor, cada solo responde de maneira singular à aplicação de teores crescentes de emulsão. Esse comportamento é de difícil previsão, uma vez que não foram encontradas correlações entre os padrões de variação dos parâmetros em estudo (umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima) e as características físicas, químicas e mineralógicas dos solos.

Observa-se em alguns trabalhos a tendência em se assumir, para as misturas de solo-emulsão, a umidade ótima e a massa específica dos solos puros. Os resultados encontrados neste trabalho desencorajam essa prática. Basear-se nos dados do solo puro pode levar ao uso de compactações incorretas das misturas solo-emulsão. Em laboratório, isso pode conduzir a confecção de misturas com resistência aquém do real potencial da amostra, tornando imprecisa a análise mecânica da técnica solo-emulsão. Em campo, os efeitos são mais preocupantes: solos compactados incorretamente resultam em camadas de pavimentos frágeis e deformáveis.

4.4.2 Resistência à Compressão Simples

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão simples desta pesquisa, foram moldados corpos de prova Proctor (10 cm de diâmetro por 12,7 cm de altura), na umidade ótima de cada mistura, à energia intermediária de compactação.

Deve-se salientar que o molde Proctor possui dimensões diferentes das apresentadas pelos corpos de prova comumente empregados em ensaios de resistência à compressão. Nesses corpos de prova, a altura é igual ao dobro do diâmetro. Com essa geometria, as amostras tendem a sofrer ruptura por cisalhamento, o que não é observado nos corpos de prova Proctor. Vale ressaltar ainda que corpos de prova com relação altura-diâmetro menor que 2 costumam apresentar resistências mais altas que os modelos que obedecem a essa relação. Optou-se por utilizar moldes com a altura reduzida visando comparar os resultados desta pesquisa com os resultados obtidos em pesquisas anteriores, como Jacintho (2005) e Miceli Jr (2006), que utilizaram o molde Proctor para confecção de seus corpos de prova.

A Figura 4.12 apresenta os padrões de ruptura típicos das amostras analisadas nesta pesquisa. Observa-se um padrão de rompimento pouco inclinado, quase vertical, diferente do padrão inclinado observado em rupturas por cisalhamento. Esse padrão de rompimento observado nos corpos de prova desta pesquisa foi também observado por Jacintho (2005) e Miceli Jr (2006).



Figura 4.12 - Padrão de ruptura das amostras submetidas aos ensaios de resistência à compressão simples.

Ressalta-se que os corpos de prova ensaiados nesta pesquisa não foram submetidos à imersão em água. Optou-se por não imergir os corpos de prova porque as reações de ruptura da emulsão asfáltica sofrem influência da perda de água, conforme foi apresentado no item 2.4.3.5 do Capítulo 2 deste trabalho. Desta forma, em uma investigação inicial como a presente pesquisa, torna-se importante verificar a influência da umidade residual sobre a resistência das misturas solo-emulsão, o que não seria possível caso os corpos de prova fossem imersos.

Entretanto, é provável que a saturação dos corpos de prova de solo-emulsão exerça grande influência sobre a sua resistência. Sant'Ana *et al.* (2007) realizaram uma investigação preliminar sobre a influência da imersão na resistência à compressão de misturas solo-emulsão. Estes autores verificaram que, embora a imersão tenha reduzido a RCS da mistura solo-emulsão de 1350 kPa para 250 kPa, a relação entre a RCS dos corpos de prova imersos e a RCS dos corpos de prova secos (relação imerso-seco) foi maior para a mistura solo-emulsão estudada que para o solo puro.

Neste contexto, reconhecendo-se a importância da avaliação do comportamento das misturas solo-emulsão em condições de saturação, ao mesmo tempo em que se julgou importante verificar a relação entre a resistência e a umidade residual das amostras, resolveu-se avaliar a influência da saturação das amostras por meio do ensaio de ISC (item 4.4.4), já que este é um ensaio realizado após 96 horas de saturação.

4.4.2.1 *Resistência à compressão simples dos solos puros*

Miceli Jr (2006) avaliou a efetividade dos diferentes processos de cura (úmida e seca ao ar) na melhoria do comportamento das misturas solo-emulsão. Este autor concluiu que a cura úmida não contribuiu para o comportamento mecânico das misturas. Vê-se, portanto, a importância da perda de umidade para a ruptura da emulsão e a conseqüente ação coesiva e impermeabilizante desta no solo. Por este motivo, o processo de cura escolhido para a avaliação da estabilização betuminosa desta pesquisa foi a cura seca ao ar.

No entanto, solos puros submetidos a perda de umidade tendem também a obter valores maiores de resistência. Logo, não se pode afirmar que o aumento de resistência

observado nas misturas após cura seca sejam totalmente creditadas à adição de emulsão. A perda de umidade também tem sua parcela de contribuição.

Tendo por objetivo quantificar separadamente as parcelas referentes à ação da emulsão e à perda de umidade, os solos puros foram submetidos também à cura seca ao ar pelo período de 7 dias. Desta forma, foi possível observar a real contribuição da emulsão asfáltica ao comportamento mecânico das misturas.

A Tabela 4.14 apresenta os valores das resistências à compressão simples dos solos puros sem cura (ditos imediatos) e com cura seca de 7 dias, bem como as umidades residuais de cada corpo de prova no momento do rompimento. Os valores médios de resistência são expostos graficamente na Figura 4.13.

Tabela 4.14 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para os solos puros.

CP	Solo A				Solo B				Solo C			
	Imediato		7 dias		Imediato		7 dias		Imediato		7 dias	
	RCS	h	RCS	h	RCS	h	RCS	h	RCS	h	RCS	h
CP 01	0,01	13,27	0,34	3,09	0,20	10,30	1,44	3,09	0,10	16,32	1,35	6,00
CP 02	0,02	13,47	0,42	1,59	0,14	10,46	1,69	3,03	0,11	15,07	1,43	6,00
CP 03	0,01	12,99	0,35	1,49	0,14	11,73	1,43	2,41	0,11	15,15	1,46	6,27
Média	0,01	13,24	0,37	2,05	0,16	10,83	1,52	2,84	0,11	15,51	1,41	6,09

RCS- Resistência à compressão simples (MPa)

h - umidade residual do corpo de prova no momento do rompimento (%)

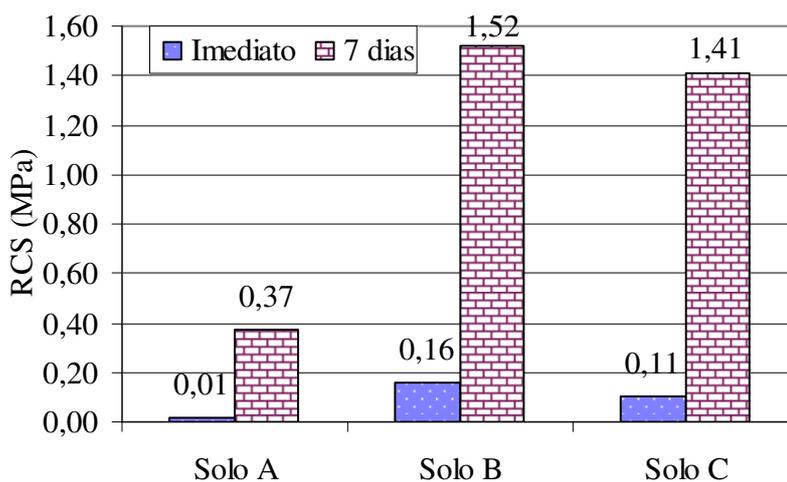


Figura 4.13 - Resultados dos ensaios de RCS para os solos puros.

Observando os efeitos da cura nos solos em estudo, percebe-se que ela é responsável por um grande aumento nos valores de resistência à compressão simples. O solo A, embora tenha obtido os menores valores, experimentou, após a cura, um

aumento da ordem de 37 vezes a resistência do solo puro rompido imediatamente após a moldagem. Os solos B e C apresentaram melhoria de cerca de uma ordem de grandeza, atingindo valores de resistência bastante elevados (aproximadamente 1,5 MPa).

Em termos percentuais, o solo A foi o que apresentou maior incremento de resistência, enquanto os solos B e C apresentaram maiores aumentos em termos absolutos: incremento de 1,36 MPa de RCS para o solo B e de 1,30 MPa para o solo C, enquanto o solo A experimentou um acréscimo de apenas 0,36 MPa.

Esse efeito mais pronunciado da cura sobre os solos B e C se deve às suas granulometrias e consistências. Vale ainda ressaltar que os solos em estudo perderam umidade em velocidades diferentes. Para os mesmos 7 dias de cura, os solos A e B perderam cerca de 85% de suas umidades de moldagem, enquanto o solo C perdeu apenas 60% de sua umidade inicial.

Nos itens a seguir são analisados os dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples para os solos estabilizados. De início, cada solo é avaliado separadamente, e depois é realizada uma análise conjunta dos resultados dos três solos.

4.4.2.2 Solo A

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para as misturas do solo A com a emulsão são apresentados na Tabela 4.15 e na Figura 4.14. Além dos valores de resistência, a Tabela 4.15 consta também das umidades residuais dos corpos de prova no momento do rompimento. As umidades residuais são expressas em termos absolutos e em termos de percentual de umidade de moldagem. Para efeito de comparação, foram inseridos na Figura 4.14 os valores de RCS do solo A puro, sem cura e após cura de 7 dias.

Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios de RCS e das umidades residuais do solo A estabilizado.

Dias de cura	A + 2%			A + 5%			A + 8%		
	RCS	h	% moldagem	RCS	h	% moldagem	RCS	h	% moldagem
0	0,02	12,17	100	0,01	9,73	100	0,01	7,97	100
7	0,81	1,07	8,90	0,58	0,75	7,50	0,61	0,61	8,50
28	0,74	0,16	1,30	0,99	0,19	1,90	0,80	0,47	3,25

RCS - resistência à compressão simples (MPa)

h - umidade residual em termos absolutos (%)

% moldagem - umidade residual em termos de percentual da umidade de moldagem

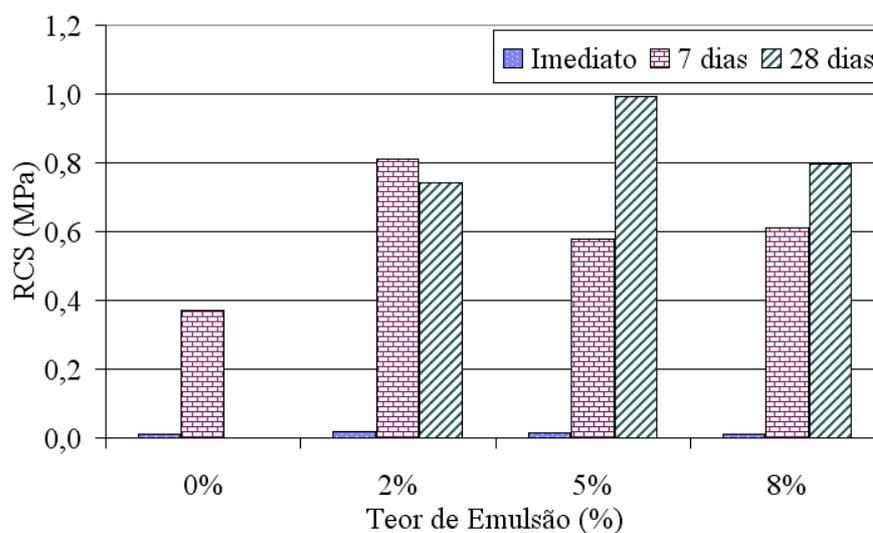


Figura 4.14 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para o solo A estabilizado.

Analizando os resultados, verifica-se que os corpos de prova estabilizados com emulsão praticamente não apresentaram variação de resistência quando submetidos aos ensaios logo após a compactação. Sem o processo de cura, os corpos de prova não apresentaram coesão e mal suportaram a desmoldagem. Verificou-se, portanto, que a aplicação de emulsão não tem efeito imediato sobre a resistência desse solo.

Comparando-se as RCS das misturas rompidas logo após moldagem com as misturas após 7 dias de secagem ao ar, percebe-se a importância da cura para o processo de estabilização de solos com emulsão asfáltica. Os efeitos da cura ficam evidenciados ao se verificar, por exemplo, que após 7 dias a mistura do solo A + 2% de emulsão atinge uma RCS de 0,81 MPa, valor este 42 vezes maior que os 0,019 MPa obtidos por esta mistura no ensaio realizado imediatamente após a compactação.

A cura tem uma manifestação ainda mais marcante após 28 dias de secagem ao ar: as misturas do solo A estabilizadas com 5% de emulsão, por exemplo, apresentaram RCS 66 vezes maior que o resultado desta mistura ensaiada imediatamente após a moldagem (aumento de 15 kPa para 994 kPa). O resultado desta mistura após a cura de 28 dias é cerca de 80 vezes maior que o resultado obtido para o solo puro ensaiado logo após a moldagem.

Convém lembrar que o aumento de resistência observado não se deve somente à adição de emulsão. Parte desse incremento na RCS se deve à perda de água dos corpos

de prova, conforme foi explicado no item 4.4.1. Comparando os resultados obtidos pelo solo estabilizado e pelo solo puro após 7 dias de cura, observou-se que a emulsão foi responsável por um aumento de até 120% na RCS (aumento de 0,371 MPa, obtido pelo solo puro, para 0,81 MPa, com 2% de emulsão). Esse fenômeno indica que a emulsão asfáltica contribuiu efetivamente para o melhoramento do parâmetro mecânico em estudo, não sendo esse efeito de responsabilidade única da perda de umidade.

A Figura 4.14 indica ainda a existência de um teor de emulsão que conduz à máxima resistência à compressão simples. Para este solo esse teor ótimo para o melhor desempenho da RCS é de 5%. A determinação deste teor ótimo para um solo granular entra em desacordo com a maioria dos trabalhos publicados anteriormente (Miceli Jr, 2006; Lucena *et al.*, 1982; Carvalho *et al.*, 1992; Soliz, 2007), que observaram a tendência de solos granulares em estabilizarem-se com teores de emulsão asfáltica menores ou iguais a 4%.

As relações sílica-alumina e sílica-sesquióxidos podem explicar por que o teor de 5% conduziu aos melhores valores de resistência. Conforme foi mencionado no item 4.2.2.3 deste capítulo, o solo A apresenta um grande percentual de sílica, o que indica a provável necessidade de uma maior quantidade de emulsão para uma estabilização satisfatória.

É importante mencionar ainda que a determinação do melhor teor em uma estabilização química é comumente relacionada a uma resistência à compressão simples admitida como mínima. Desta forma, dependendo do limite de aceitação da resistência, poderia ser possível a utilização de teores inferiores a 5%, para o caso deste solo. No entanto, ainda não há uma definição sobre limite mínimo de resistência a ser exigido para estabilização betuminosa, o que mostra a importância de estudos de campo e laboratório que fomentem a determinação de valores mínimos de resistência e a compilação de normas de dosagem para as misturas solo-emulsão.

4.4.2.3 Solo B

As médias das resistências à compressão simples para as misturas do solo B com emulsão são apresentadas na Tabela 4.16 e na Figura 4.15. As umidades residuais dos corpos de prova no momento da realização de cada ensaio foram inseridas na Tabela

4.16. A Figura 4.15 consta ainda dos resultados de resistência à compressão do solo B puro, sem cura e após cura seca de 7 dias.

Tabela 4.16 - Resultados dos ensaios de RCS e das umidades residuais do solo B estabilizado.

Dias de cura	B+ 2%			B + 5%			B + 8%		
	RCS	h	% moldagem	RCS	h	% moldagem	RCS	h	% moldagem
0	0,28	10,68	100	0,23	10,34	100	0,26	8,68	100
7	2,43	4,34	39,50	1,94	4,87	45,95	1,25	4,32	44,96
28	1,73	1,27	11,58	1,68	0,62	5,86	1,34	0,47	4,89

RCS - resistência à compressão simples (MPa)

h - umidade residual em termos absolutos (%)

% moldagem - umidade residual em termos de percentual da umidade de moldagem

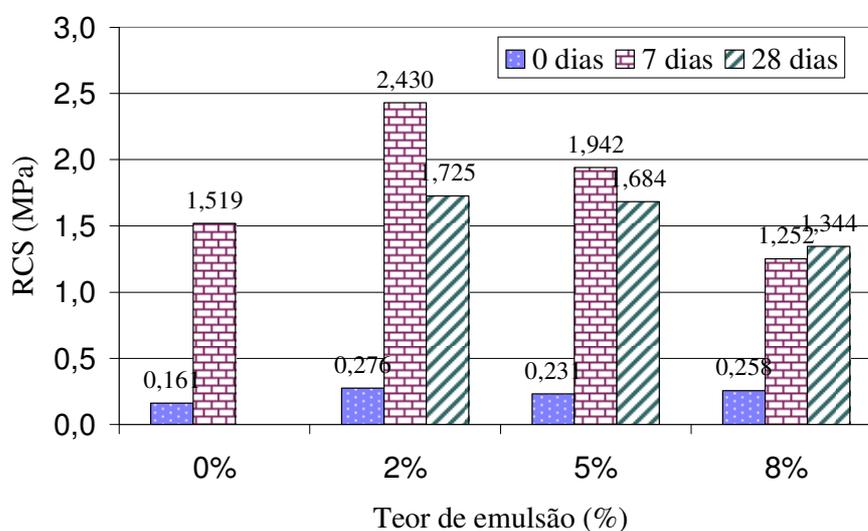


Figura 4.15 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para solo B estabilizado.

Os resultados apresentados na Figura 4.15 sugerem que a adição de emulsão asfáltica ao solo B provocam modificações na resistência deste solo logo que se inicia a mistura. Os ensaios realizados imediatamente após a moldagem indicam que as amostras de solo B estabilizadas com emulsão apresentaram, em média, resistências 58% mais altas que as amostras do solo B puro. Verifica-se que o processo de ruptura da emulsão teve início mais cedo nas misturas com o solo B que nas misturas com o solo A.

Após 7 dias de cura, os acréscimos na RCS são ainda mais visíveis, mostrando a importância da cura para o desempenho mecânico das amostras. As misturas do solo B com 2% de emulsão, por exemplo, experimentaram após esse período um aumento de resistência de cerca de 780% (aumentado de 0,276 MPa para 2,43 MPa).

Contudo, com o prolongamento do tempo de cura para 28 dias, verifica-se que as RCS das misturas solo B-emulsão tendem a diminuir. A maior redução ocorreu para o teor de 2%: a resistência desta mistura caiu 30% em relação à sua resistência aos 7 dias de cura, enquanto a mistura do solo B com 5% de emulsão sofreu uma redução de 15%. O teor de 8%, no entanto, não seguiu a tendência: após o prolongamento da cura, a resistência dessa mistura mostrou um leve crescimento com relação à cura de 7 dias.

A redução dos valores de resistência com o aumento de tempo de cura não foi observada em nenhum dos trabalhos estudados para a realização desta pesquisa. Os pesquisadores que investigaram o efeito da cura sobre os parâmetros mecânicos das misturas de solo-betume são unânimes na opinião de que este processo é imprescindível para a qualidade das misturas. Entre os pesquisadores que chegaram a esta conclusão, citam-se Ferreira (1980), Carvalho *et al.* (1992), Miceli Jr (2006) e Soliz (2007). As razões dessa queda de resistência em tempos maiores de cura são analisadas posteriormente no item 4.4.2.5, em conjunto com as outras amostras de solo.

Ainda com relação aos resultados dos ensaios para as misturas com o solo B, verificou-se a existência de um teor de emulsão ótimo para o qual se observa uma resistência máxima. Observou-se ainda que, a partir desse teor ótimo, a aplicação de teores crescentes de emulsão asfáltica conduz a valores decrescentes de resistência, de tal forma que se obteve com o teor de 8% uma resistência menor que a do solo puro.

Para este solo, o teor de emulsão que resultou em um maior incremento de resistência foi o teor de 2%. A mistura solo B + 2% de emulsão atingiu uma RCS 60% maior que a obtida pelo solo puro também submetido à cura seca de 7 dias. Embora as misturas com 2% de emulsão tenham sofrido redução de 30% na RCS após 28 dias de secagem ao ar, este teor apresentou os maiores valores de resistência para todos os tempos de cura, sendo apontado como o teor ótimo para a máxima RCS do solo B.

4.4.2.4 Solo C

Apresentam-se na Tabela 4.17 e na Figura 4.16 os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples do solo C e de suas misturas com emulsão asfáltica, bem como as umidades residuais dos corpos de prova no momento da realização dos ensaios.

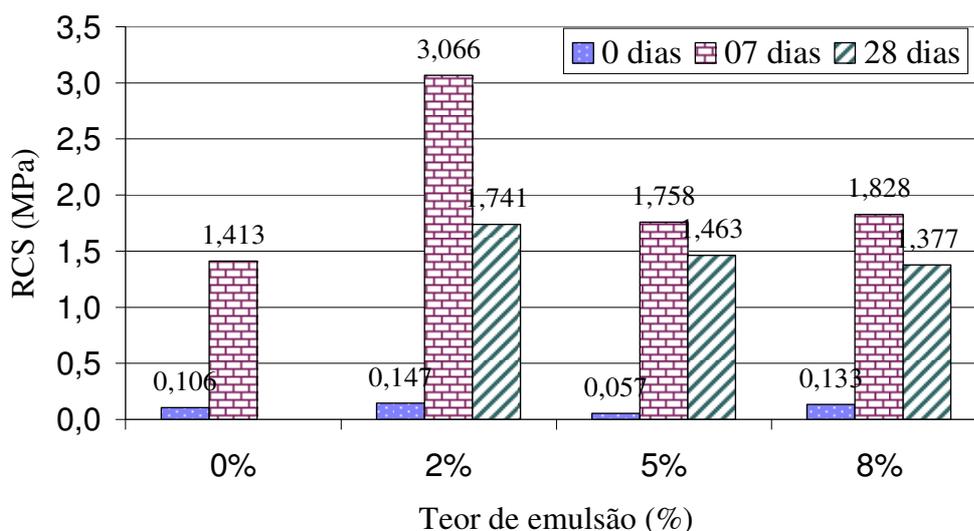
Tabela 4.17 - Resultados dos ensaios de RCS e das umidades residuais do solo C estabilizado.

Dias de cura	C+ 2%			C + 5%			C + 8%		
	RCS	h	% moldagem	RCS	h	% moldagem	RCS	h	% moldagem
0	0,15	14,04	100	0,06	14,69	100	0,13	13,05	100
7	3,06	11,45	75	1,76	9,81	65	1,83	8,70	67
28	1,74	3,51	27	1,46	3,85	26	1,38	3,92	30

RCS - resistência à compressão simples (MPa)

h - umidade residual em termos absolutos (%)

% moldagem - umidade residual em termos de percentual da umidade de moldagem

**Figura 4.16** - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para solo C estabilizado.

O comportamento do solo C estabilizado, no que se refere à resistência à compressão simples, é semelhante ao comportamento do solo B estabilizado.

Assim como no solo B, a cura seca ao ar por 7 dias trouxe grande benefício para a resistência do solo C. Após esse período, a resistência da mistura solo C + 2% de emulsão cresceu 20 vezes, atingindo o valor de aproximadamente 3 MPa. Esse valor é o dobro da resistência obtida pelo solo C puro após 7 dias de cura. Os outros teores de emulsão também experimentaram um grande aumento de resistência após esse mesmo período, mas seus valores mostraram-se apenas um pouco maiores que os valores obtidos pelo solo sem adição de nenhum estabilizante, após secagem de 7 dias.

Com o prolongamento do tempo de cura para 28 dias, todas as misturas sofreram redução na RCS, sendo este efeito mais pronunciado para o teor de 2% de emulsão. Esta

mistura ficou cerca de 40% mais frágil ao fim deste período, enquanto os teores de 5% e 8% sofreram reduções de resistência de 15% e 25%, respectivamente.

Verificou-se também para esta amostra a existência de um teor ótimo de emulsão capaz de obter valores máximos de RCS, e que a aplicação de maiores quantidades de emulsão asfáltica conduziu à redução do parâmetro mecânico estudado. O teor ótimo de emulsão asfáltica para a obtenção da maior resistência à compressão simples para este solo é o teor de 2%.

4.4.2.5 *Efeitos da Estabilização Betuminosa na RCS de Solos Estudados*

Nos itens anteriores foram realizadas as análises individuais da resistência à compressão simples para cada solo. O presente item tem por objetivo identificar os padrões de comportamento apresentados pelas três amostras de solo.

Foi observada, para os três solos, a importância da cura seca ao ar livre por um período de 7 dias. Os incrementos de resistência observados após esse período indicam que ocorreu o processo de ruptura da emulsão, e que o material asfáltico presente na mistura começa a exercer seu papel de aglutinante.

Verificou-se, ainda, a existência de um teor ótimo de emulsão que conduziu à máxima RCS em cada solo, e que a aplicação de teores maiores de emulsão levou à redução da resistência. Assim como foi explicado por Ingles e Metcalf (1972), a aplicação do teor ótimo de emulsão ao solo possibilita a criação de um filme betuminoso sobre as partículas, conferindo-lhes um acréscimo de coesão, o que resulta na resistência máxima da mistura. Com aplicação de teores maiores que o teor ótimo, os filmes betuminosos que se formam são muito espessos, o que diminui o atrito entre as partículas e, conseqüentemente, diminui a resistência das misturas (ver item 2.5).

Por outro lado, um questionamento surgiu após a comparação dos resultados dos solos A, B e C: por que o prolongamento do tempo de cura exerceu influência negativa sobre a resistência à compressão simples dos solos (sobretudo para os solos B e C), contrariando os resultados encontrados na literatura?

Inicialmente esse fenômeno foi creditado às severas condições de cura do estado do Ceará. Levantou-se uma teoria de que o clima seco e as altas temperaturas

características deste estado seriam responsáveis por uma perda de umidade mais abrupta que outras regiões do país. A perda brusca de umidade causaria micro-trincas por retração nos corpos de prova, reduzindo assim a resistência à compressão simples.

Analisando os resultados de Miceli Jr (2006), verificou-se que os teores residuais de umidades das amostras por ele estudadas não variam muito dos teores encontrados para os corpos de prova da presente pesquisa. No entanto, diferentemente do que se observou neste trabalho, as misturas de solo-emulsão estudadas por Miceli Jr (2006) experimentaram acréscimo de resistência com o aumento do tempo de cura. As umidades residuais médias dos corpos de prova ensaiados por este pesquisador são apresentadas na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 - Umidades residuais dos corpos de prova de solo A-Miceli.

Solo A Miceli	Teor de Emulsão				
	0%	2%	4%	6%	8%
0 dias	11,5	11	10,7	11	11,6
7 dias	3,8	4,67	4,31	4,05	4,34
28 dias	1,3	2,16	2,53	2,4	2,66

Uma vez que a avaliação da umidade residual como um fator absoluto, independente de outros parâmetros, não conduziu a uma justificativa satisfatória, surgiu a idéia de correlacionar essa umidade com os valores de resistência à compressão simples.

Numa tentativa de observar a tendência de variação da RCS em função das umidades residuais dos solos, foram elaborados gráficos nos quais o eixo das ordenadas representa os valores de resistência à compressão simples e o eixo das abscissas representa os valores das umidades residuais. Os solos puros e as suas misturas com os diversos teores de emulsão foram tratados independentemente, de forma que cada mistura apresenta sua própria série de dados.

A Figura 4.17 apresenta os gráficos de RCS × Umidade Residual referentes ao solo A e suas misturas com emulsão.

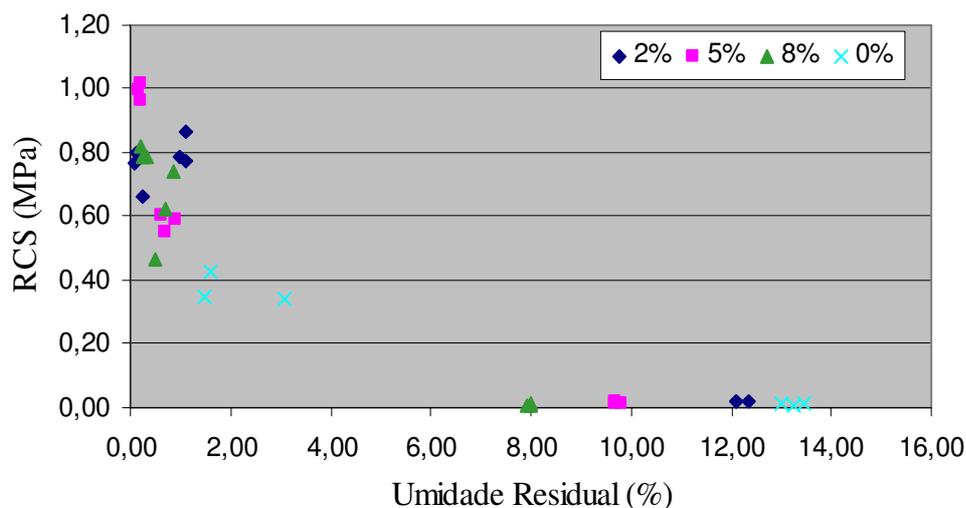


Figura 4.17 - Variação da RCS em função da umidade residual para o solo A.

Observando atentamente este gráfico, identificou-se, visualmente, que a resistência à compressão simples destas amostras tende, aparentemente, a crescer exponencialmente com a perda da umidade, conforme as linhas de tendência apresentadas na Figura 4.18.

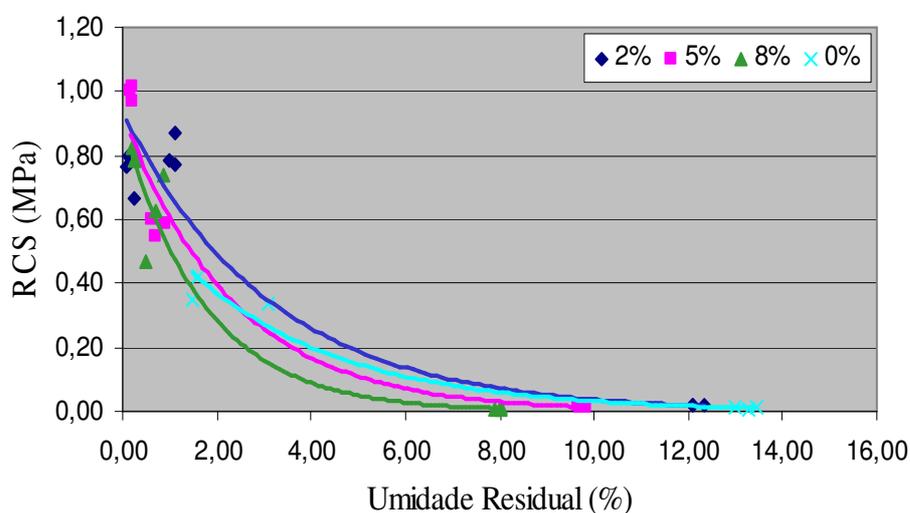


Figura 4.18 - Linhas de tendência das relações RCS × Umidade residual para o solo A.

O mesmo procedimento foi então aplicado para o solo B e suas misturas com emulsão. Os gráficos de RCS × Umidade Residual referentes às amostras são apresentadas na Figura 4.19.

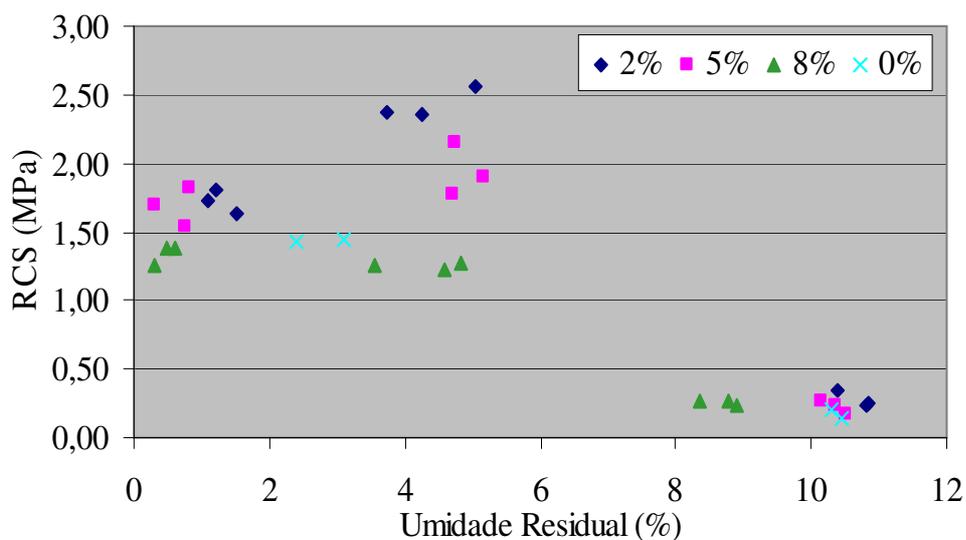


Figura 4.19 - Variação da resistência à compressão simples em função da umidade residual para o solo B.

O padrão de comportamento observado para as amostras referentes ao solo B parece ser bem representado por parábola, diferente da variação exponencial verificada para as amostra do solo A. Foram então traçadas linhas de tendência polinômiais de segundo grau, apresentadas na Figura 4.20.

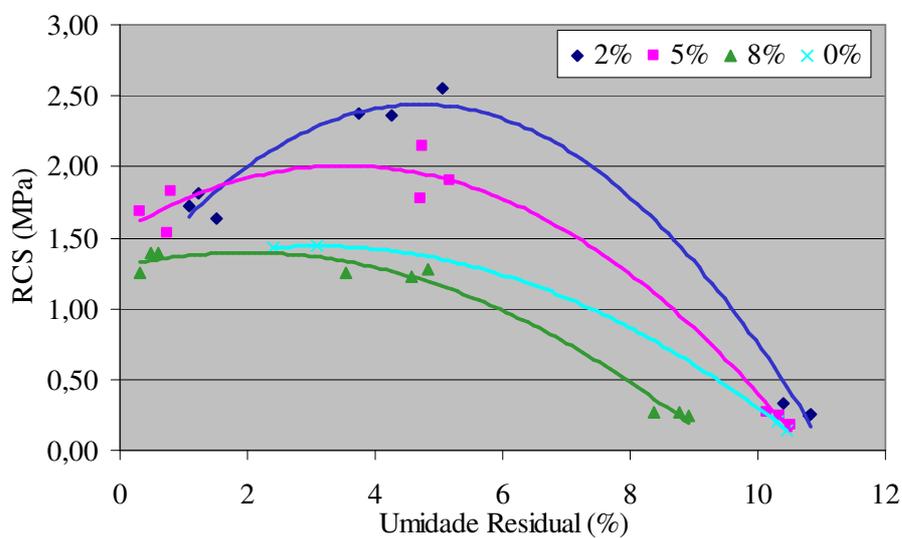


Figura 4.20 - Linhas de tendência das relações RCS × Umidade residual para o solo B.

O próximo passo foi aplicar o procedimento para os resultados do solo C e suas misturas. Os gráficos referentes às amostras do solo C são apresentados na Figura 4.21.

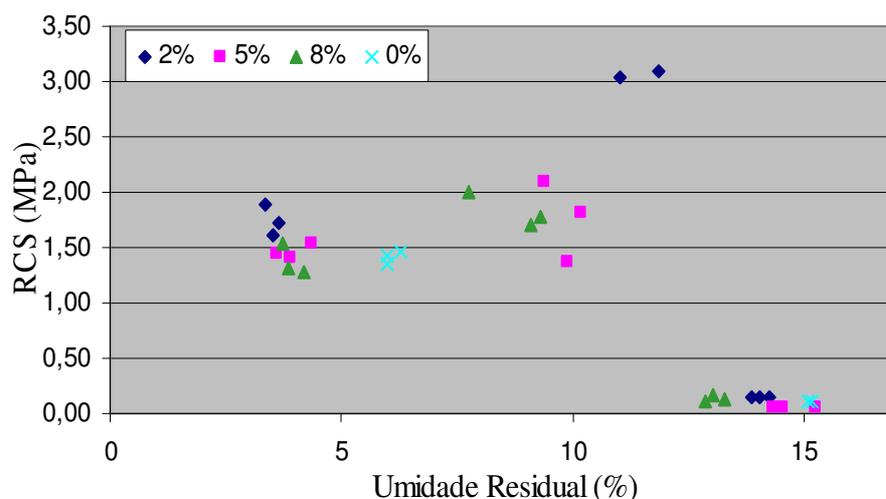


Figura 4.21 - Variação da resistência à compressão simples em função da umidade residual do solo C.

O padrão de comportamento observado para este solo foi similar ao observado para o solo B: a tendência de variação da RCS com a umidade residual pareceu ser descrita por um polinômio de 2ª ordem, conforme as linhas de tendência polinomiais apresentadas na Figura 4.22.

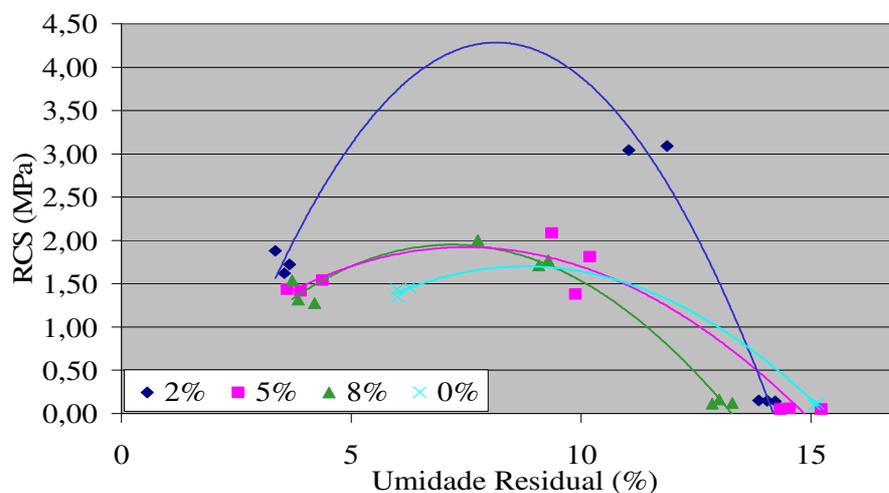


Figura 4.22 - Linhas de tendência das relações RCS × Umidade residual para o solo C.

É importante comentar que contou-se com poucos dados para a determinação das regressões e linhas de tendência de todas as misturas. Assim, a confiabilidade das relações umidade × resistência, para os três solos estudados, precisa ainda ser melhor averiguada. Todavia, com o objetivo de realizar uma primeira aproximação aos padrões

de comportamento das misturas solo-emulsão, foram elaborados os comentários que se seguem, supondo a aplicabilidade das tendências encontradas.

Com relação aos padrões de variação da resistência à compressão simples com a umidade residual para as amostras de solo, dois modelos foram encontrados: o padrão exponencial para o solo A e o padrão parabólico para os solos B e C.

Buscou-se encontrar uma justificativa para essa diferença de comportamento na caracterização dos solos. Verificou-se que o padrão de comportamento pode ser explicado pelas características físicas das amostras. O solo A é um solo arenoso não plástico, enquanto os solos B e C apresentam maiores percentuais de finos e são moderadamente plásticos. Verifica-se, portanto, que o solo A é pouco coesivo, enquanto os solos B e C são mais coesivos.

As misturas de emulsão com os solos mais coesivos pareceram ter o seu comportamento mecânico descrito por uma parábola, enquanto as misturas com o solo pouco coesivo teve seu comportamento aparentemente descrito por uma função exponencial.

Desta forma, as misturas com solos coesivos apresentaram um máximo de resistência para uma dada umidade residual ótima. A umidade residual ótima pode ser encontrada por meio da derivada primeira da equação de regressão, e a resistência máxima será a resistência referente a esse teor de umidade.

As misturas com solos não coesivos, por sua vez, não apresentaram um pico de resistência, sugerindo que quanto mais seca estiver a mistura solo-emulsão após a sua compactação, maior seria a resistência à compressão alcançada por ela.

Com base nessas observações, levantou-se uma nova teoria: a perda de umidade, a partir de certo teor residual, provocaria a formação de micro-trincas por retração nos corpos de prova reduzindo assim a resistência à compressão simples. Esse efeito seria mais acentuado em solos coesivos, mais susceptíveis aos efeitos da sucção. Em solos granulares e não coesivos, quase não se observa retração, e a perda de umidade ocasiona uma diminuição da lubrificação entre as partículas e o aumento da coesão aparente, resultando em uma crescente resistência.

Com o objetivo de verificar a aplicabilidade desta teoria para amostras pertencentes a outro universo amostral, foram traçados os gráficos RCS \times umidade residual para os resultados encontrados por Miceli Jr (2006), apresentados na Tabela 4.18. Este pesquisador estudou a técnica solo-emulsão para um solo não coesivo (amostra A-Miceli) e um solo coesivo (amostra B-Miceli). As linhas de tendência obtidas para as misturas com o solo A-Miceli e com o solo B-Miceli são apresentadas na Figura 4.23 e 4.24, respectivamente.

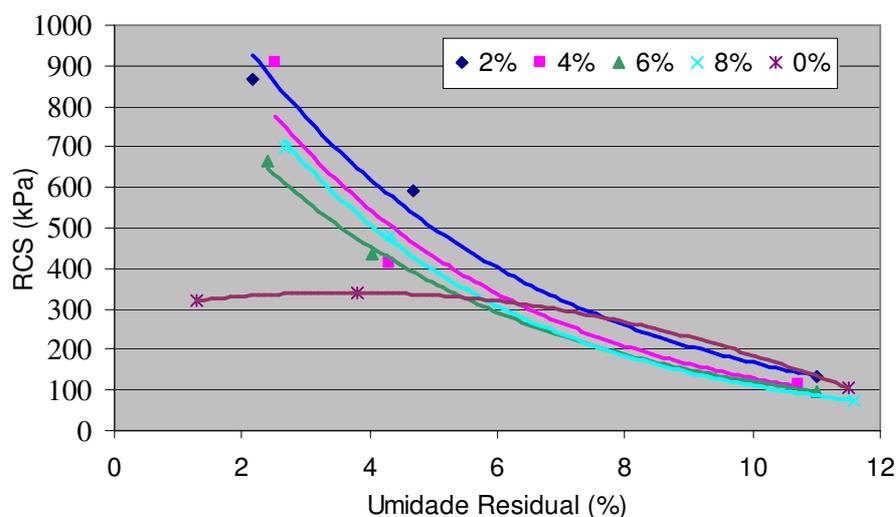


Figura 4.23 - Linhas de tendência das relações RCS \times Umidade residual para o solo A-Miceli.

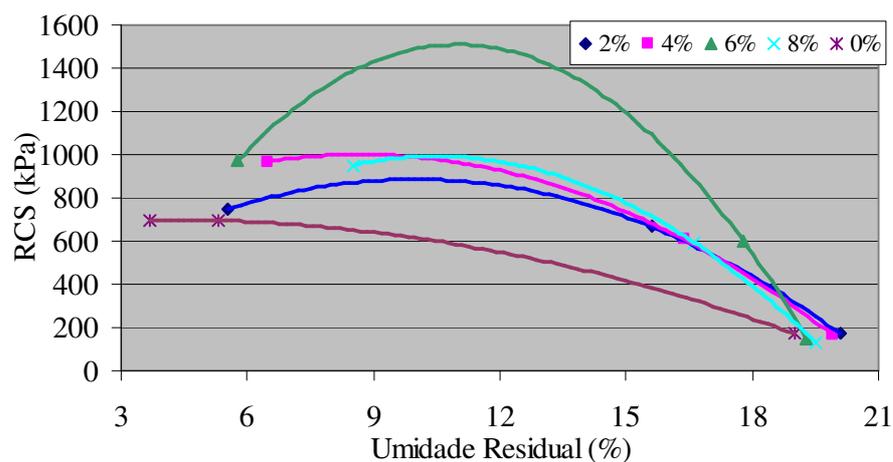


Figura 4.24 - Linhas de tendência das relações RCS \times Umidade residual para o solo B-Miceli.

Mais uma vez, ressalta-se a pequena quantidade de dados utilizados para a determinação das regressões. Vale lembrar a importância da verificação da

aplicabilidade dos modelos para conclusões efetivas sobre as curvas Resistência \times umidade residual. O objetivo desta avaliação inicial é a identificação de tendências a serem investigadas de maneira mais aprofundada no futuro.

O padrão de comportamento mecânico dos solos estudados por Miceli Jr (2006) parece ser similar ao padrão observado para as amostras desta pesquisa: a resistência do solo coesivo varia parabolicamente com a umidade residual, enquanto a resistência do solo não coesivo varia exponencialmente com a variação da umidade residual.

Acredita-se que a análise da RCS baseada unicamente nos tempos de cura conduziu Miceli Jr (2006) à conclusão de que o solo B-Miceli não é caracterizado pela presença de um teor que leve a uma RCS máxima. No entanto, pela análise das curvas de RCS \times umidade residual, verificou-se, para este mesmo solo, a existência de um teor ótimo de 6% de emulsão, com o qual a mistura atinge uma resistência máxima de cerca de 1500 kPa, bem maior que os 899kPa que esta amostra atingiu após 28 dias de cura. Contudo, torna-se importante verificar se a mistura solo B-Miceli + 6% de emulsão é realmente capaz de atingir a resistência prevista pela curva, confirmando assim a aplicabilidade do modelo.

A teoria levantada anteriormente visando explicar fisicamente o fenômeno da variação da RCS com a perda de umidade não foi contrariada pelos resultados da análise com os solos estudados por Miceli Jr (2006). Essa teoria pode ser resumida da seguinte forma: a perda de umidade tem efeitos diferentes em misturas de solos coesivos e solos não coesivos. Nas misturas de solos coesivos com emulsão, inicialmente, à medida que se perde umidade, aumenta-se a coesão aparente das misturas, o que resulta em acréscimos de resistência. A partir de determinado teor residual de umidade, há o surgimento de trincas por retração e a conseqüente queda de resistência. Nas misturas com solos não coesivos, a perda de umidade reduz a lubrificação entre as partículas e aumenta a coesão aparente, resultando em incrementos de resistência.

Os modelos propostos mostraram-se aplicáveis às misturas dos solos estudados com emulsão asfáltica. Todavia, estudos mais aprofundados devem ser realizados a fim de confirmar a aplicabilidade da técnica, contando com mais tipos de solos e com ensaios executados em intervalos menores de perda de umidade.

Uma vez confirmada a capacidade desse modelo em representar o comportamento mecânico das misturas solo-emulsão, pode-se sugerir que o procedimento descrito neste item seja aplicado como método de dosagem para as misturas.

4.4.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A resistência à tração por compressão diametral, ou resistência à tração indireta (RTI), não é uma característica medida em solos puros, pois, de um modo geral, esses materiais apresentam baixa capacidade de resistir aos esforços de tração.

No entanto, para materiais utilizados em camadas de revestimento, a RTI é um importante parâmetro de caracterização, uma vez que a tensão de tração no fundo desta camada corresponde a um esforço crítico, que deve ser suportado pelo material empregado.

As misturas dos solos com emulsão asfáltica estudadas nesta pesquisa foram submetidas aos ensaios de RTI com o intuito de verificar o seu potencial para utilização em camadas de revestimento. Para tanto, os resultados dos ensaios de RTI das misturas solo-emulsão são comparados aos valores típicos de resistência à tração de misturas betuminosas empregadas comumente em revestimentos de rodovias.

Para a realização dos ensaios de resistência à tração indireta dos solos estabilizados, foram moldados, em compactador mecânico, corpos de prova tipo Marshall (10 cm de diâmetro e altura entre 5,5 cm e 6,5 cm), na umidade ótima de cada mistura, à energia intermediária de compactação.

Os corpos de prova das misturas solo-emulsão foram submetidos aos ensaios sob três condições de cura: imediatamente após a moldagem, após 7 dias de cura seca ao ar e após 28 dias de secagem ao ar.

Os corpos de prova rompidos imediatamente após a moldagem apresentaram resistências muito baixas, de forma que a célula de carga foi incapaz de registrar o valor da carga máxima suportada pelas amostras. Embora não se tenha o registro dos valores das cargas máximas, observou-se que a ruptura dos corpos de prova não se deu de forma imediata ao início do carregamento, indicando que as amostras ensaiadas apresentam

certa resistência. Em virtude disto, assumiu-se para estas amostras uma RTI tendendo a zero.

A Figura 4.25 ilustra o padrão de ruptura típico das amostras curadas de solo-emulsão analisadas nesta pesquisa. Observa-se um padrão de rompimento similar ao padrão observado em misturas betuminosas, sendo possível verificar, inclusive, a área do corpo de prova que esteve em contato com o friso de carga inferior.



Figura 4.25 - Padrão de ruptura das misturas solo-emulsão submetidas aos ensaios de RTI.

Nos itens a seguir são analisados, individualmente, os resultados dos ensaios de resistência à tração indireta para as misturas de cada solo. Posteriormente é realizada uma análise comparativa entre os valores representativos de RTI de cada amostra e os valores típicos de RTI de diversos tipos de misturas betuminosas usualmente utilizadas em camadas de revestimento.

4.4.3.1 *Misturas com o Solo A*

Os resultados da RTI e das umidades residuais dos corpos de prova das misturas do solo A com emulsão asfáltica são apresentados na Tabela 4.19 e na Figura 4.26.

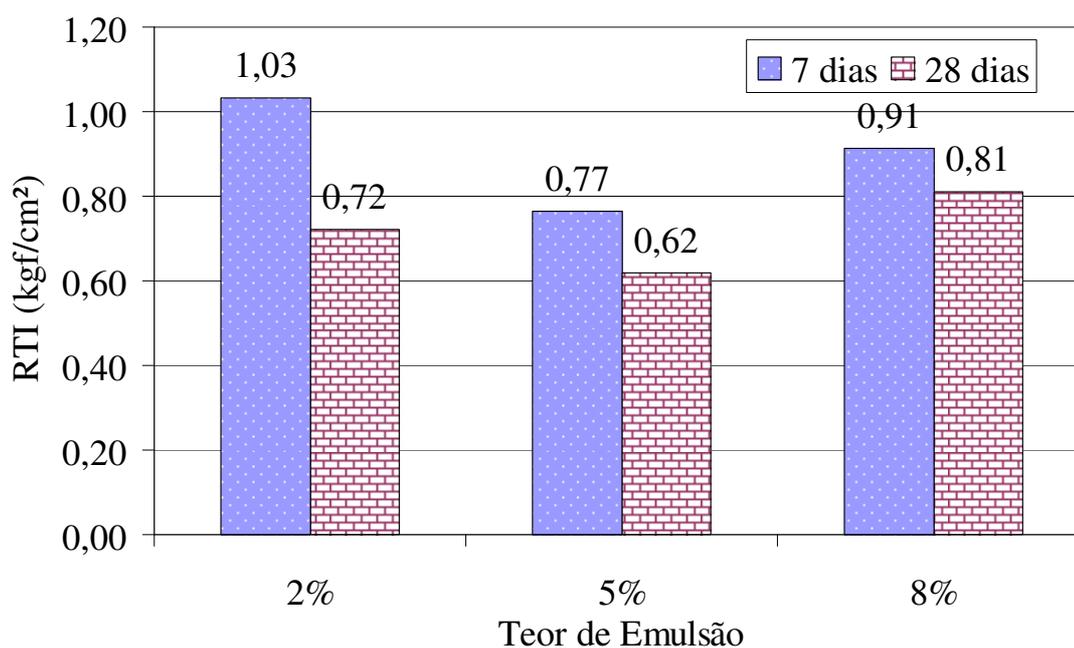
Tabela 4.19 - Resultados de RTI e das umidades residuais das misturas do solo A com emulsão asfáltica.

Dias de cura	A+ 2%			A + 5%			A + 8%		
	RTI (kgf/cm ²)	h (%)	% moldagem	RTI (kgf/cm ²)	h (%)	% moldagem	RTI (kgf/cm ²)	h (%)	% moldagem
0	0,00	11,84	100	0,00	9,13	100	0,00	7,98	100
7	1,03	0,67	5,65	0,77	0,20	2,20	0,91	0,14	1,80
28	0,72	0,47	3,97	0,62	0,01	0,11	0,81	0,11	1,38

RTI - resistência à tração indireta (kgf/cm²)

h - umidade residual em termos absolutos (%)

% moldagem - umidade residual em termos de percentual da umidade de moldagem

**Figura 4.26** - Resultados dos ensaios de RTI para as misturas do solo A com emulsão asfáltica.

Ao analisar os resultados apresentados, verifica-se mais uma vez a importância da cura para a resistência das misturas solo-emulsão. Enquanto as amostras ensaiadas logo após a moldagem praticamente não apresentaram resistência à tração, as amostras ensaiadas após 7 dias de cura seca chegaram a atingir uma RTI de 1,03 kgf/cm² (caso da mistura do solo A com 2% de emulsão).

Com relação ao prolongamento do tempo de cura, os efeitos observados para a RTI diferem dos efeitos vistos para a resistência à compressão simples, para esta mesma amostra. Os resultados de RTI das amostras referentes ao solo A após 28 dias de cura foram inferiores aos valores observados ao final da cura de 7 dias, enquanto a resistência à compressão simples das mesmas amostras mostrou-se crescente com o prolongamento do tempo de secagem.

Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato da resistência à tração depender diretamente da coesão da mistura. Acredita-se que corpos de prova excessivamente secos são menos coesivos e por isso apresentam menores valores de RTI.

Com relação ao teor ótimo de emulsão para a obtenção da máxima RTI, os resultados dos ensaios indicaram a superioridade do teor de 2% sobre os demais teores. Note-se que este valor é inferior ao teor de 5% de emulsão indicado para a obtenção da máxima resistência à compressão simples (ver item 4.4.2.2).

Vê-se, então, um impasse para a determinação do teor ótimo de emulsão para a estabilização betuminosa do solo A. O teor de 2% de emulsão seria capaz de conduzir a mistura a uma máxima RTI, mas a RCS obtida estaria muito aquém de um desempenho desejável.

A dosagem desta mistura deve ser realizada levando-se em consideração o tipo de solicitação a que este material estará sujeito. Se a intenção é empregar este solo estabilizado em camada de base de rodovias, a solicitação de maior importância será a tensão vertical. Desta forma, o teor ótimo de emulsão da mistura deverá ser aquele que conduz aos maiores valores de resistência à compressão axial (RCS). Para o solo A, a máxima RCS é observada com teor de 5% de emulsão.

Se, no entanto, pretende-se empregar este material em camada de revestimento, a tensão horizontal no fundo desta camada é o parâmetro crítico de resistência. Essa tensão horizontal é suportada pela resistência à tração indireta. Neste caso, o teor escolhido para esta mistura deve ser o teor capaz de suportar as maiores tensões horizontais, ou seja, deve ser o teor que apresente a maior RTI. Para a estabilização deste solo visando seu emprego em camada de revestimento, o teor ótimo de emulsão apontado é o teor de 2%.

4.4.3.2 *Misturas com o Solo B*

Os resultados dos ensaios de RTI e as umidades residuais no instante do rompimento das misturas do solo B com emulsão asfáltica são apresentados na Tabela 4.20 e na Figura 4.27.

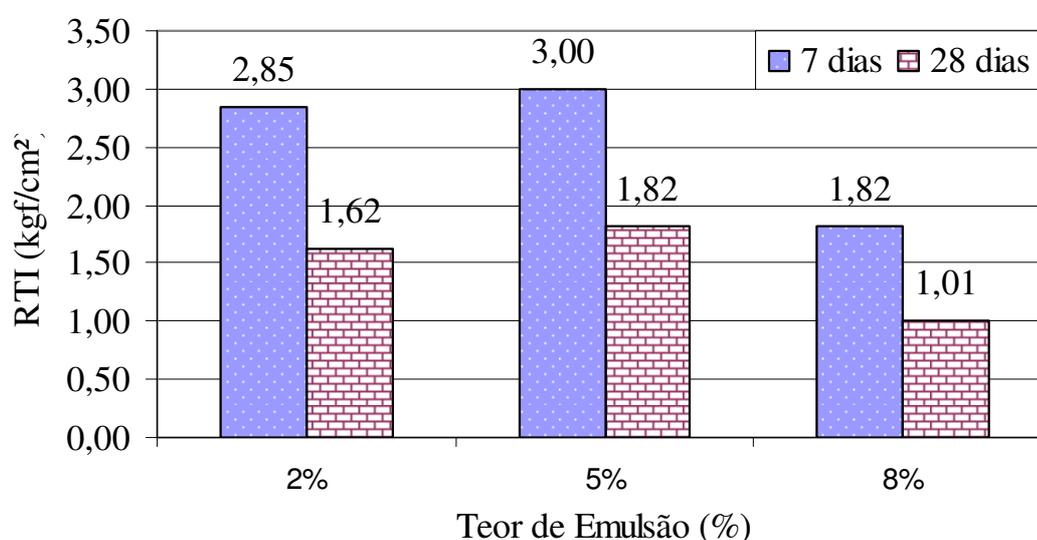
Tabela 4.20 - Resultados de RTI e das umidades residuais das misturas do solo B com emulsão asfáltica.

Dias de cura	B + 2%			B + 5%			B + 8%		
	RTI (kgf/cm ²)	h (%)	% moldagem	RTI (kgf/cm ²)	h (%)	% moldagem	RTI (kgf/cm ²)	h (%)	% moldagem
0	0,00	10,95	100,00	0,00	10,63	100,00	0,00	8,65	100,00
7	2,85	4,53	41,36	3,00	4,01	37,72	1,82	2,62	30,29
28	1,62	0,79	7,21	1,82	1,11	10,44	1,01	0,25	2,89

RTI - resistência à tração indireta (kgf/cm²)

h - umidade residual em termos absolutos (%)

% moldagem - umidade residual em termos de percentual da umidade de moldagem

**Figura 4.27** - Resultados dos ensaios de RTI para as misturas do solo B com emulsão asfáltica.

As amostras estabilizadas do solo B experimentaram grande incremento de resistência após secagem ao ar pelo período de 7 dias. A RTI das amostras, que era praticamente nula nos corpos rompidos imediatamente após a moldagem, atingiu valores próximos a 3,00 kgf/cm², com os teores de 2% e 5% de emulsão asfáltica. A adição do teor de 8% de emulsão resultou em um acréscimo menor de resistência que os outros teores, atingindo apenas 1,82 kgf/cm² de resistência à tração indireta.

Mais uma vez, verificou-se que o prolongamento do tempo de cura para 28 dias resultou em redução nos valores de resistência. Todas as misturas sofreram redução de cerca de 40% nos valores de RTI. Verificou-se desta forma que a secagem excessiva dos corpos de prova tornou-os menos resistentes aos esforços de tração.

A escolha do teor ótimo baseado no critério de resistência à tração indicaria a utilização do teor de 2%, uma vez que a resistência à tração alcançada por este teor é bastante próxima à resistência atingida pelo teor de 5%. A indicação do menor teor seria justificada pela relação custo-benefício: com a utilização de menos da metade da quantidade de emulsão seria possível atingir praticamente os mesmos valores de resistência à tração. A utilização do menor teor de emulsão para a construção da camada tornaria o empreendimento mais econômico.

Para o solo B, o teor ótimo indicado para a obtenção da maior RTI, coincide com o teor ótimo sugerido para o alcance da maior RCS. Logo, a adição de 2% conduziria ao melhor desempenho da estabilização betuminosa do solo B, tanto para utilização em camada de base como para o emprego em camada de revestimento.

4.4.3.3 Misturas com o Solo C

Os resultados dos ensaios de RTI e das umidades residuais das amostras estabilizadas do solo C são apresentados na Tabela 4.21 e na Figura 4.28.

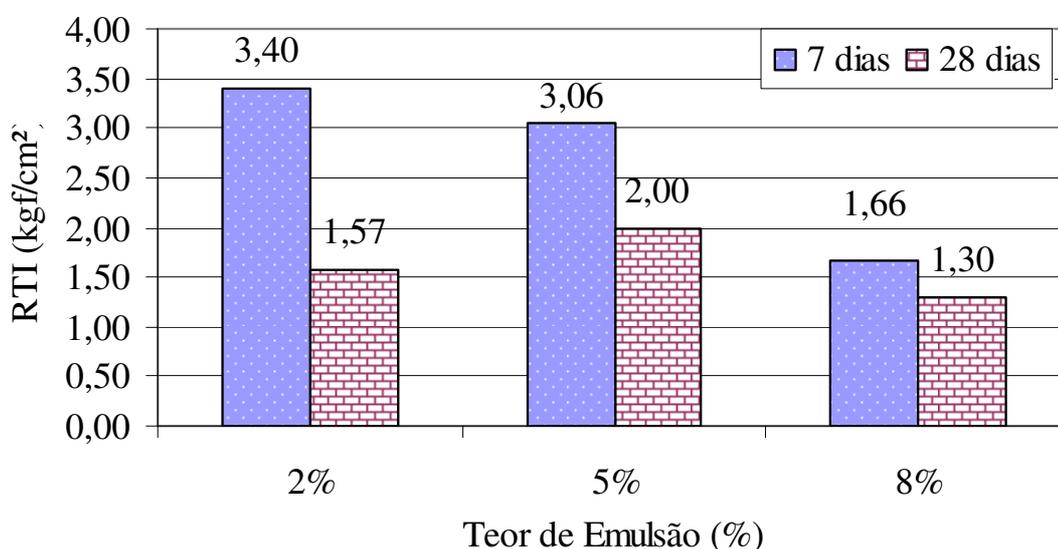


Figura 4.28 - Resultados dos ensaios de RTI para as misturas do solo C com emulsão asfáltica.

Tabela 4.21 - Resultados de RTI e das umidades residuais das misturas do solo C com emulsão asfáltica.

Dias de cura	C + 2%			C + 5%			C + 8%		
	RTI (kgf/cm ²)	h (%)	% moldagem	RTI (kgf/cm ²)	h (%)	% moldagem	RTI (kgf/cm ²)	h (%)	% moldagem
0	0,00	15,31	100,00	0,00	14,38	100,00	0,00	13,58	100,00
7	3,40	7,24	47,28	3,06	6,26	43,53	1,66	6,24	45,94
28	1,57	4,20	27,43	2,00	3,20	22,25	1,30	3,09	22,75

RTI - resistência à tração indireta (kgf/cm²)

h - umidade residual em termos absolutos (%)

% moldagem - umidade residual em termos de percentual da umidade de moldagem

No que se refere à resistência à tração indireta, o comportamento observado para o solo C estabilizado foi semelhante ao comportamento descrito para os outros dois solos.

Observou-se que a cura seca ao ar pelo período de 7 dias promoveu grande incremento na resistência à tração das amostras estabilizados deste solo: verificou-se que a RTI cresceu de um valor tendendo a zero aos valores de 3,4 kgf/cm², 3,06 kgf/cm² e 1,66 kgf/cm² referentes aos teores de 2%, 5% e 8% de emulsão, respectivamente.

Assim como foi verificado para as outras amostras de solo, o prolongamento do tempo de cura para 28 dias provocou queda nos valores de resistência. As misturas em todos os teores de emulsão sofreram redução de resistência à tração, sendo esse efeito mais acentuado para o teor de 2% (a RTI desta mistura foi reduzida a 50% do valor obtido aos 7 dias de cura).

Para esta amostra, o teor de emulsão que conduz à máxima resistência à tração é o teor de 2%. Assim como no caso da amostra B, esse teor (2%) conduz a amostra de solo C à máxima resistência à compressão simples e à máxima resistência à tração por compressão diametral. Tal resultado indica que esse deve ser o teor ótimo para a estabilização deste solo.

4.4.3.4 Comparação dos Valores de RTI Encontrados para as Misturas Solo-Emulsão e Outras Pesquisas

Nos itens anteriores foi discutida a influência exercida pelo tempo de cura e pelos teores de emulsão sobre a resistência à tração indireta dos solos A, B e C estabilizados. Neste item é realizada uma comparação dos valores de RTI obtidos pelas misturas solo-emulsão, em seus teores ótimos, com os valores de RTI encontrados em

pesquisas similares a esta e com valores típicos de RTI de outras misturas betuminosas empregadas em camadas de revestimento.

Na Tabela 4.22 são apresentados os valores máximos de RTI para cada tipo de solo estudado nesta pesquisa, obtidos após 7 dias de cura.

Tabela 4.22 - RTI máximas obtidas para os solos A, B e C.

Amostra	f(Tempo de Cura)	
	Teor ótimo	RTI (kgf/cm ²)
Solo A	2%	1,03
Solo B	2%	2,85
Solo C	2%	3,40

Os valores de resistência à tração indireta encontrados nesta pesquisa são condizentes com os valores encontrados em trabalhos semelhantes, como as pesquisas desenvolvidas por Ferreira (1980), Lucena *et al.* (1982) e Miceli Jr (2006). As resistências obtidas por estes autores são da mesma ordem de grandeza que os valores apresentados na Tabela 4.22.

Não foi possível comparar os efeitos do prolongamento do tempo de cura observados nesta pesquisa com outros resultados da literatura, pois as outras investigações da RTI contemplaram apenas uma condição de cura. Ferreira (1980) avaliou a RTI dos corpos de prova submetidos aos ensaios após secagem em estufa a 60°C, pelo período de 24 horas, enquanto Miceli Jr (2006) e Lucena *et al.* (1982) avaliaram a resistência à tração das misturas submetidas à secagem ao ar pelo período de 7 dias.

Na Tabela 4.23 são apresentados valores típicos de RTI de algumas misturas betuminosas, citadas por Bernucci *et al.* (2007). No escopo deste trabalho, esses valores são considerados referência para a comparação dos valores de resistência à tração obtidos pelas misturas solo-emulsão.

Tabela 4.23 - Valores típicos de RT para misturas asfálticas (adaptado de Bernucci *et al.*, 2007).

Tipo de mistura	Valores típicos de RT (MPa)	Valores típicos de RT (kgf/cm ²)
Misturas Asfálticas a Quente	0,5 - 2,0	5 - 20
Misturas Asfálticas Drenantes	0,5 - 0,8	5 - 8
Stone Matrix Asphalt (SMA)	0,8 - 1,2	8 - 12
Misturas de Módulo Elevado (EME)	2,0 - 3,0	20 - 30

Comparando os resultados obtidos nesta pesquisa com os valores de referência, verifica-se que as amostras de solo-emulsão estudadas apresentam resistência à tração muito baixas. As máximas RTI das misturas avaliadas nesta pesquisa são, em sua maioria, muito inferiores aos valores típicos de resistência indicadas por Bernucci *et al.* (2007). Isto indica que as misturas solo-emulsão provavelmente não devem ser empregadas em camadas de revestimento de pavimentos com um maior volume de tráfego, e que seu emprego em camadas de base não revestidas de rodovias de baixo volume de tráfego deve ser aprovado somente mediante uma avaliação numérica das tensões e deformações a que este pavimento estará sujeito.

4.4.4 Índice de Suporte Califórnia

A principal motivação para a realização dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) nesta pesquisa foi verificar como as misturas de solo-emulsão se comportariam sob condições saturadas. Todavia, deve-se destacar que os ensaios de ISC não são adequados para verificação do comportamento de misturas estabilizadas quimicamente, visto que o método de dimensionamento empírico para tais misturas leva em consideração os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples.

Para a realização dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia, foram moldados corpos de prova em cilindro CBR, na umidade ótima de cada mistura, à energia intermediária de compactação. As misturas de solo-emulsão foram submetidas às diferentes condições de cura (sem cura, após cura seca ao ar pelos períodos de 7 dias e 28 dias), antes de serem imersas em água pelo período de 96 horas.

Discute-se a seguir os resultados dos ensaios de ISC para cada amostra de solo isoladamente. Em seguida é realizada uma análise conjunta das três amostras.

4.4.4.1 Solo A

Os valores de ISC obtidos para o solo A e suas misturas com emulsão asfáltica são apresentados na Figura 4.29.

Avaliando a Figura 4.29, verifica-se que as misturas do solo A com emulsão asfáltica obtiveram valores de ISC inferiores ao valor alcançado pelo solo A puro. Vê-se ainda que mesmo após períodos de cura prolongados, as capacidades de suporte das

misturas continuam menores que a capacidade do solo natural. Para este solo, não foi identificado nenhum padrão de comportamento que descreva a variação dos valores de ISC com relação aos diferentes tempos de cura.

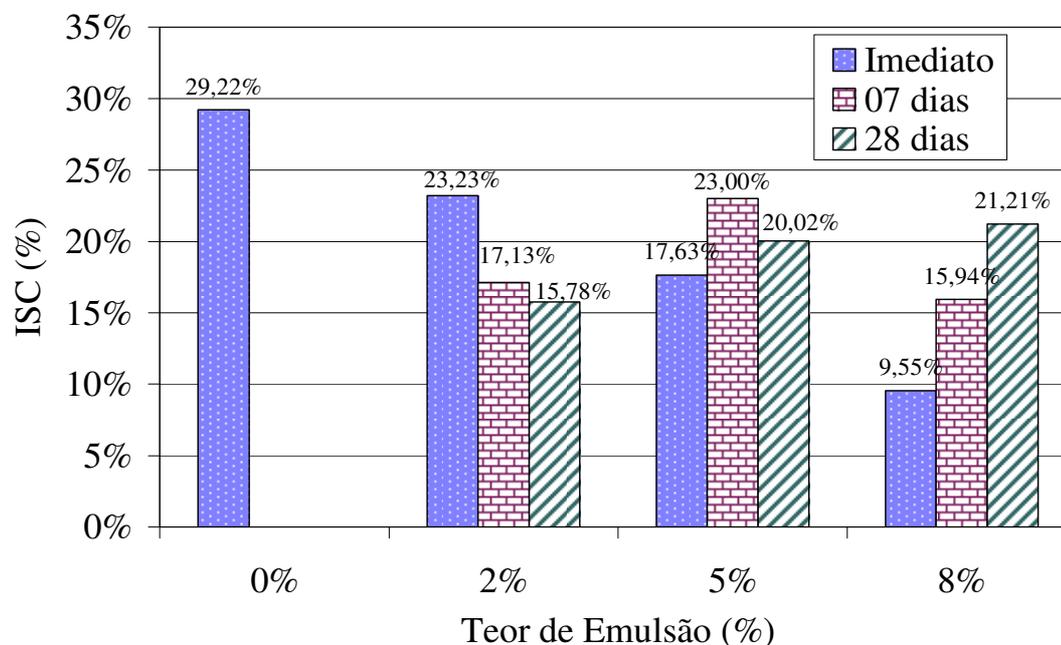


Figura 4.29 - Resultados dos ensaios de ISC do solo A e suas misturas com emulsão asfáltica.

Também não foi observada para esta amostra a existência de um teor ótimo de emulsão que conduza a uma máxima capacidade de suporte, uma vez que as misturas estabilizadas apresentaram valores de ISC menores que o valor observado para o solo puro.

À luz dos ensaios de ISC, verificou-se que a emulsão asfáltica não foi capaz de estabilizar a amostra de solo A. No entanto, a análise da resistência à compressão simples para este solo conduziu à conclusão de que a adição de emulsão asfáltica é responsável por um considerável aumento de resistência.

Atribuiu-se a explicação para o insucesso da estabilização betuminosa deste solo, no que se refere a ISC, às condições de realização do ensaio. Os ensaios de ISC foram realizados em corpos de prova saturados, enquanto os ensaios de RCS foram realizados em corpos de prova secos ao ar. Este resultado leva a crer que as misturas do solo A com emulsão asfáltica são susceptíveis à ação da água, sendo desaconselhável a utilização dessas misturas em rodovias que serão sujeitas as condições de saturação.

4.4.4.2 Solo B

Na Figura 4.30 podem ser visualizados os valores de ISC obtidos pelo B e suas misturas com os diversos teores de emulsão asfáltica.

A avaliação dos resultados apresentados na Figura 4.30 indica, mais uma vez, que a adição de emulsão asfáltica não resulta em melhorias na capacidade de suporte do solo: as misturas estabilizadas, para 28 dias de cura, apresentaram ISC máximos de valores muito próximos ao ISC verificado para o solo B puro. Supõe-se, também para este solo, que a imersão dos corpos de prova prejudicou o efeito da estabilização betuminosa.

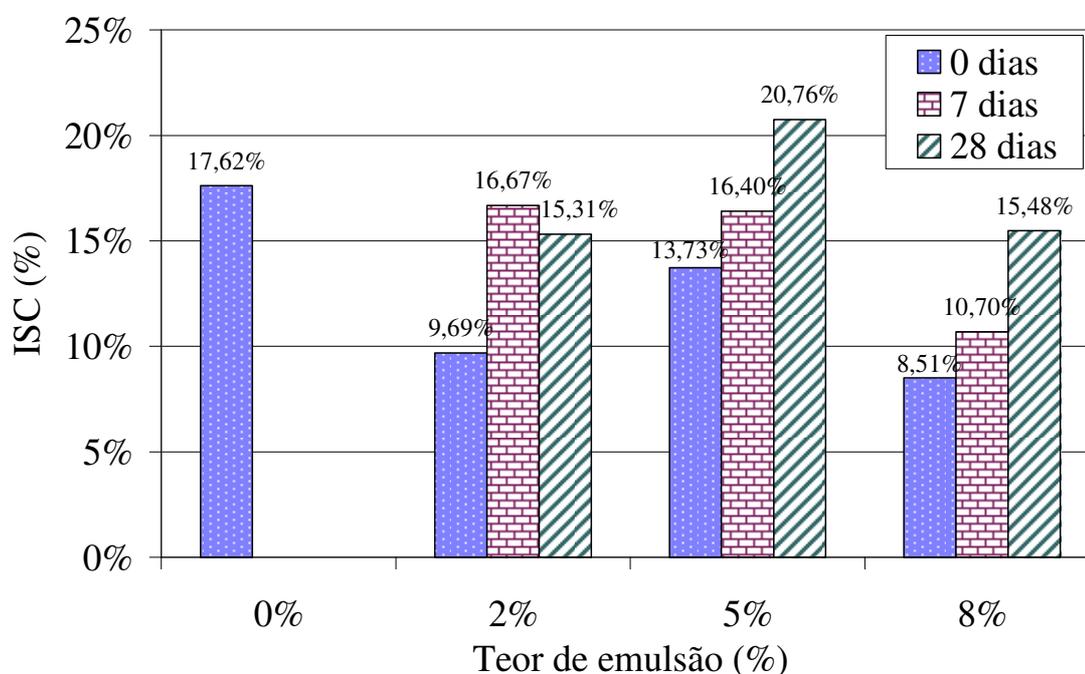


Figura 4.30 - Resultados dos ensaios de ISC do solo B e suas misturas com emulsão asfáltica.

Para esta amostra de solo também não faz sentido pensar na determinação de um teor ótimo que conduza aos melhores resultados de ISC, uma vez que praticamente não se observou melhorias nesse parâmetro de resistência a partir da adição de emulsão.

Os efeitos do processo de cura indicam que a saturação das misturas solo-emulsão, embora tenha prejudicado a estabilização betuminosa, não anulou completamente o efeito da adição de emulsão ao solo. Esse fenômeno sugere que a imersão é menos prejudicial às misturas do solo B que às misturas do solo A.

4.4.4.3 Solo C

Os resultados dos ensaios de ISC do solo C e suas misturas com emulsão asfáltica podem ser visualizados na Figura 4.31.

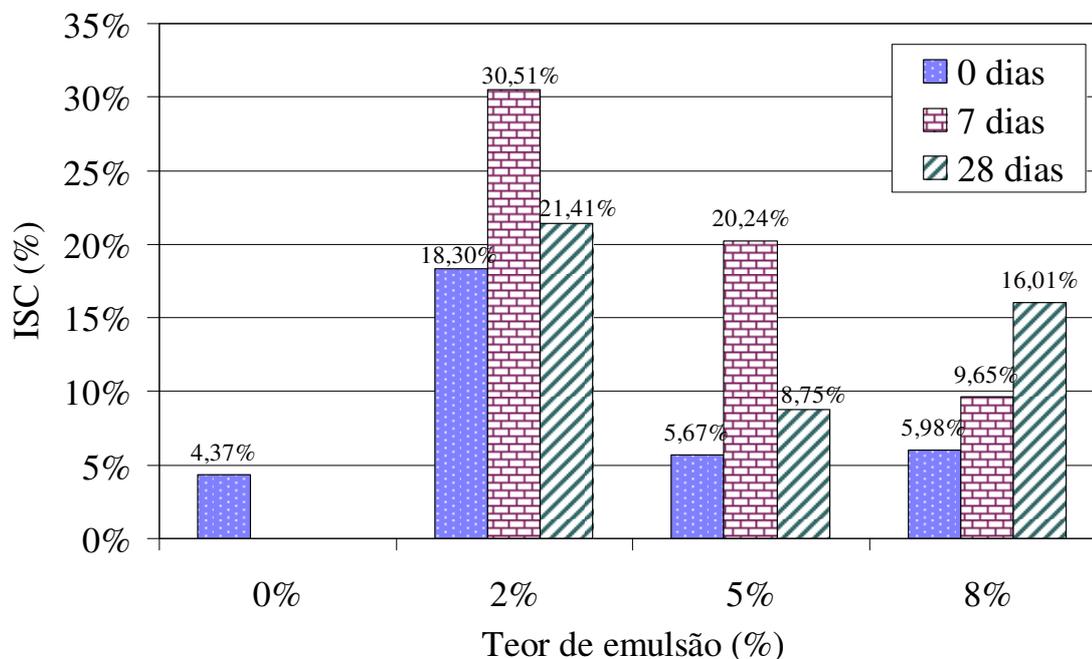


Figura 4.31 - Resultados dos ensaios de ISC do solo C e suas misturas com emulsão asfáltica.

Contrariando o que foi observado para os solos anteriores, a adição de emulsão asfáltica promoveu significativa melhora na capacidade de suporte do solo C. Este solo apresentava um ISC muito baixo (4,37% apenas) mas, após a adição da emulsão, chegou a atingir ISC de 30% (mistura Solo C+ 2%, após 7 dias de cura), sendo este um valor já aceitável pra a utilização deste material em camadas de sub-base de pavimentos, à luz dos ensaios de ISC.

Ressalta-se que os solos argilosos apresentam resistência à ação das cargas quando secos, mas quando úmidos, podem se tornar plásticos e apresentar deformações específicas, como o que foi observado para a amostra de Solo C pura. A emulsão asfáltica, para este solo, parece ter agido como um filme protetor, impedindo que a saturação influenciasse na deformabilidade do material.

O processo de cura mostrou-se eficiente para a capacidade de suporte das misturas estudadas. A secagem das amostras ao ar pelo período de 7 dias antes da

imersão conduziu a aumentos de 68% (com o teor de 2% de emulsão) e de 250% (caso do teor de 5%) no ISC das misturas.

Seguindo a tendência observada nos ensaios de RCS e RTI, o prolongamento do tempo de cura, antes da imersão, resultou em queda na capacidade de suporte nas misturas estudadas.

Observou-se para este solo a existência de um teor ótimo de emulsão que conduz ao máximo ISC: o teor de 2%. Ressalta-se ainda que o teor ótimo de emulsão apresentado pelo parâmetro em estudo foi o mesmo teor ótimo indicado pelos resultados de RCS e de RTI.

4.4.4.4 *Efeitos da Estabilização Betuminosa sobre o Índice de Suporte Califórnia dos Solos Estudados*

Analisando conjuntamente os efeitos da estabilização betuminosa sobre os resultados dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia para as 3 amostras de solo em estudo, verifica-se que cada solo apresentou comportamento diferente. As amostras estabilizadas do solo A apresentaram ISC menores que o solo A puro. A adição de emulsão asfáltica ao solo B praticamente não afetou o ISC dessa amostra. A estabilização betuminosa do solo C fez o ISC crescer de 4,37% para 30%, tornando possível a utilização desta amostra em camadas de sub-base de pavimentos. Ressalta-se aqui, mais uma vez, a inaplicabilidade do ensaio de ISC na avaliação do comportamento de misturas estabilizadas quimicamente.

Convém lembrar que os ensaios de ruptura para medidas dos parâmetros de resistência mecânica analisados anteriormente (RCS e RTI) indicaram os efeitos positivos da adição de emulsão asfáltica sobre todas as amostras de solo estudadas. Por este motivo, creditou-se o insucesso da estabilização betuminosa, à luz dos ensaios de ISC, às condições de realização deste ensaio, ou seja, à condição de saturação. Desta forma, induz-se que cada amostra de solo estudada reagiu de maneira singular à imersão em água.

Jacinto (2005) ao estudar os efeitos da estabilização betuminosa sobre o ISC de três amostras de solo de diferentes composições granulométricas, deparou-se também com uma situação semelhante: cada uma de suas amostras apresentou comportamento

diferente, no que se refere aos ensaios de ISC. Santana (1976) relata que foram realizadas algumas pesquisas em laboratório com o intuito de se verificar a variação nos valores de ISC com o teor de emulsão, não sendo obtido nenhum resultado conclusivo. Assim como na presente pesquisa e no trabalho de Jacintho (2005), Santana (1976) comenta que a aplicação de emulsão tanto pode aumentar como diminuir o ISC de um solo.

Buscou-se encontrar na literatura informações sobre as interações solo-betume em condições de imersão em água. Com relação a este assunto, Ingles e Metcalf (1972) afirmam que os efeitos da estabilização betuminosa em areias puras podem ser perdidos se houver penetração de água nas misturas. Eles explicam que a água pode desfazer a fraca aderência entre o betume e a superfície da sílica. Desta forma, amostras com concentração elevada de sílica tenderiam a perder os efeitos da estabilização quando imersas em água.

Os resultados dos ensaios de ISC desta pesquisa parecem corroborar com a afirmação de Ingles e Metcalf (1972). Observando os resultados na análise química dos solos estudados, verificou-se que a amostra C, a única que apresentou melhorias nos valores de ISC após a estabilização, é a amostra de solo que apresenta a menor concentração de sílica, apresentando inclusive relação sílica-sesquióxidos (Kr) inferior a 2 (ver item 4.2.2 e 4.2.2.3).

Os resultados desta análise indicam que, possivelmente, a concentração de sílica nas amostras de solo venha a ser um fator limitador para sua estabilização com emulsão asfáltica, especialmente em casos onde este material estará sujeito a condições de saturação. Entretanto, estudos mais aprofundados, com uma maior quantidade de amostras devem ser realizados para conclusões mais confiáveis.

4.4.5 Módulo de Resiliência

Os ensaios triaxiais dinâmicos, também conhecidos como ensaios de Módulo de Resiliência (MR), foram realizados no âmbito desta pesquisa com a finalidade de investigar o comportamento da deformabilidade das misturas de solo-emulsão.

Para a realização desses ensaios, os corpos de prova foram moldados em cilindro tripartido, de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, sob energia intermediária de compactação, à umidade ótima de cada mistura.

Os corpos de prova dos solos puros foram submetidos aos ensaios imediatamente após a moldagem, e após cura seca ao ar pelo período de 7 dias, a fim de se verificar a influência da perda de umidade sobre o módulo de resiliência desses solos. Os corpos de prova referentes às misturas de solo-emulsão foram submetidos aos ensaios sob três condições de cura: imediatamente após a moldagem, após cura seca ao ar pelo período de 7 dias e após cura seca ao ar pelo período de 28 dias.

A fase de condicionamento e o ensaio propriamente dito foram realizados conforme estabelecido no item 3.3.5.5 do Capítulo 3.

No próximo item, explica-se como se determinou o processo de escolha do modelo de comportamento resiliente para a análise das misturas solo-emulsão. Nos itens que se seguem são avaliados os comportamentos resilientes das amostras de solo e suas misturas com emulsão asfáltica.

4.4.5.1 *Escolha do Modelo Resiliente*

A análise da estabilização de um solo consiste, basicamente, em avaliar as modificações que este processo impõe ao material em estudo. Desta forma, a avaliação do processo de estabilização consiste de uma análise comparativa entre os resultados dos ensaios obtidos pelo solo e por suas misturas estabilizadas. Por este motivo, é imprescindível que as avaliações dos comportamentos resilientes dos solos naturais e das diversas misturas sejam baseadas em um mesmo modelo.

A escolha de um modelo que descreva com a maior fidelidade possível o comportamento resiliente de um solo é de fundamental importância para a avaliação correta da deformabilidade deste material. A utilização de diferentes modelos resilientes pode conduzir a uma grande variação nos resultados.

Para a avaliação dos efeitos de um processo de estabilização de solos a escolha do melhor modelo torna-se ainda mais complexa. O modelo a ser escolhido precisa descrever o comportamento resiliente do solo em seu estado natural e de suas misturas

estabilizadas com exatidão e ainda ser capaz de expressar as modificações ocorridas durante o processo.

Para a escolha do modelo a ser empregado nesta pesquisa, avaliou-se inicialmente a aplicabilidade dos modelos clássicos para a descrição do comportamento resiliente dos solos puros e estabilizados. Esses modelos relacionam o MR com a tensão desvio (σ_d), com a tensão de confinamento (σ_3) e com o invariante de tensões ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$), de maneira isolada, conforme mostrado nas equações (4.4), (4.5) e (4.6).

$$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (4.4)$$

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (4.5)$$

$$MR = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (4.6)$$

Onde MR é o Módulo de Resiliência, σ_d é a tensão desvio, σ_3 é a tensão de confinamento, θ é invariante de tensões e os valores de k são os parâmetros de modelagem que definem numericamente cada modelo.

Os parâmetros de modelagem (valores de k) e os coeficientes de correlação (R^2) dos modelos clássicos para os solos A, B e C e suas misturas são apresentados na Tabela 4.24.

Analisando os parâmetros dos diferentes modelos, verificou-se que os coeficientes de correlação relativos aos modelos em função da tensão confinante e do invariante de tensões apresentaram valores bastante significativos para as amostras referentes ao solo A, indicando que esses modelos representam com confiabilidade o comportamento resiliente desta amostra. As amostras referentes ao solo C, por sua vez, são melhores descritas pelo modelo em função da tensão desvio, enquanto as amostras do solo B e suas misturas estabilizadas não encontraram grande representatividade em nenhum dos três modelos, pois não há padrão de comportamento único.

Tabela 4.24 - Parâmetros dos modelos Clássicos de Resiliência para os solos A, B e C.

Amostra	Cura (dias)	MR = $k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$			MR = $k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$			MR = $k_1 \cdot \theta^{k_2}$		
		k1	k2	R ²	k1	k2	R ²	K1	k2	R ²
A	0	970,4	0,61	0,98	462,60	0,45	0,79	355,81	0,60	0,98
	7	695,4	0,35	0,74	514,93	0,31	0,87	406,53	0,37	0,87
A + 2%	0	852,3	0,537	0,98	433	0,379	0,74	351,57	0,514	0,96
	7	2331,5	0,643	0,96	1084,5	0,475	0,79	817,92	0,627	0,98
	28	2621,4	0,743	0,93	1155,1	0,577	0,85	796,19	0,739	0,98
A + 5%	0	779,9	0,546	0,98	390,6	0,385	0,74	316,42	0,522	0,96
	7	2159,8	0,591	0,94	1086,6	0,441	0,79	827,7	0,578	0,97
	28	2486,4	0,650	0,97	1111,4	0,466	0,76	856,81	0,626	0,98
A + 8%	0	754,4	0,524	0,99	381	0,360	0,71	315,8	0,497	0,95
	7	1892,6	0,552	0,95	907	0,376	0,66	753,05	0,520	0,91
	28	1672,8	0,497	0,98	865,6	0,336	0,68	730,96	0,468	0,93
B	0	226,1	-0,022	0,01	171,06	-0,151	0,34	214,54	-0,091	0,09
	7	536,17	0,169	0,48	479,2	0,1672	0,63	417,89	0,189	0,60
B + 2%	0	314,74	0,159	0,31	201,57	0,004	0,00	225,61	0,096	0,12
	7	1599,9	0,601	0,94	793,23	0,450	0,80	603,78	0,589	0,97
	28	471,28	0,121	0,31	424,14	0,107	0,35	393,27	0,134	0,38
B + 5%	0	139,26	-0,162	0,18	128,26	-0,241	0,62	167,58	-0,220	0,36
	7	657,45	0,286	0,87	482,6	0,225	0,82	416,34	0,286	0,93
	28	888,45	0,383	0,81	618,95	0,324	0,88	489,34	0,395	0,92
B + 8%	0	96,15	-0,297	0,51	108,98	-0,320	0,90	146,06	-0,342	0,72
	7	439,84	0,204	0,47	392,97	0,208	0,74	327,68	0,229	0,64
	28	585,82	0,252	0,65	495,31	0,245	0,92	403,49	0,276	0,83
C	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	276,74	0,096	0,12	426,8	0,240	0,70	352,88	0,280	0,67
C + 2%	0	136,52	-0,214	0,40	141,95	-0,254	0,85	181,91	-0,258	0,62
	7	544,9	0,212	0,58	480,26	0,213	0,89	399,95	0,236	0,77
	28	1068,4	0,327	0,82	773,95	0,271	0,85	639,43	0,333	0,91
C + 5%	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	734,04	0,174	0,21	547,18	0,090	0,09	539,87	0,150	0,17
	28	675,03	0,285	0,70	547,23	0,268	0,94	440,36	0,308	0,87
C + 8%	0	162,56	-0,142	0,26	158,93	-0,197	0,70	195,23	-0,189	0,46
	7	491,45	0,192	0,41	428,32	0,182	0,56	369,26	0,208	0,52
	28	766,01	0,292	0,62	617,77	0,273	0,82	495,11	0,314	0,77

Buscando a uniformização da análise de resultados, resolveu-se investigar a aplicação do modelo composto às misturas estudadas, tendo em vista que nenhum dos modelos relacionados a uma única variável representaram de forma precisa os comportamentos resilientes de todas as amostras testadas. Esse modelo, representado pela equação (4.7), é função das tensões de confinamento e desvio, simultaneamente.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (4.7)$$

Para a obtenção dos parâmetros referentes a esse modelo, os dados obtidos nos ensaios foram submetidos ao processamento pelo programa Lab Fit Ajuste de Curvas, desenvolvido para tratamento e análise de dados experimentais. Os parâmetros dos modelos compostos referentes aos solos A, B e C são apresentados na Tabela 4.25.

Tabela 4.25 - Parâmetros do modelo Composto para os solos A, B e C.

Amostra	A		A + 2%			A + 5%			A + 8%			
Cura	0	7	0	7	28	0	7	28	0	7	28	
Modelo Composto	K1	939,1	675,3	890,8	2362,4	2707	798,2	2236	2483	763,7	2032	1677
	K2	0,52	0,11	0,491	0,522	0,549	0,505	0,466	0,537	0,495	0,530	0,479
	K3	0,11	0,30	0,081	0,164	0,269	0,065	0,179	0,144	0,043	0,063	0,023
	R ²	1,00	0,93	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,96	0,99
Amostra	B		B + 2%			B + 5%			B + 8%			
Cura	0	7	0	7	28	0	7	28	0	7	28	
Modelo Composto	K1	285,2	542,7	400	1451	488,6	142,2	614,4	878,7	103,2	406,8	530,9
	K2	0,377	0,041	0,487	0,416	0,063	0,211	0,161	0,198	0,042	-0,036	0,013
	K3	-0,403	0,171	-0,308	0,191	0,091	-0,460	0,128	0,231	-0,394	0,270	0,260
	R ²	0,84	0,69	0,91	0,98	0,44	0,71	0,93	0,95	0,88	0,81	0,93
Amostra	C		C + 2%			C + 5%			C + 8%			
Cura	0	7	0	7	28	0	7	28	0	7	28	
Modelo Composto	K1	-	501,9	169,8	507	1072	-	813,1	613,6	208	493,9	724,7
	K2	-	0,033	0,113	-0,005	0,185	-	0,227	0,042	0,157	0,021	0,047
	K3	-	0,272	-0,319	0,243	0,182	-	-0,031	0,267	-0,279	0,219	0,286
	R ²	-	0,79	0,88	0,91	0,93	-	0,22	0,96	0,72	0,66	0,88

Os valores dos coeficientes R² referentes ao modelo composto, conforme apresentado na Tabela 4.25, mostraram a sua supremacia frente aos outros modelos testados. Por este motivo, o modelo composto foi eleito para a avaliação das variações de MR dos solos, decorrentes da estabilização betuminosa. O modelo composto tem se mostrado bastante aplicável aos solos ocorrentes no estado do Ceará, conforme observado no trabalho de Souza Junior (2005).

Vale destacar que o modelo composto é representado graficamente por uma superfície, o que torna possível a avaliação visual das modificações impostas pelos diversos fatores sobre os parâmetros resilientes do solo. Decidiu-se, então, realizar a análise desta pesquisa de forma qualitativa, por meio de uma avaliação visual comparativa entre as superfícies descritas pelas diferentes misturas solo-emulsão. Para isto, foi elaborado um algoritmo executado pelo programa Matlab, que tornou possível a visualização de várias superfícies em um mesmo gráfico. Este algoritmo é apresentado do ANEXO 1, desta pesquisa.

Com o auxílio deste algoritmo, agruparam-se, em um mesmo gráfico, as superfícies referentes aos diferentes teores de emulsão, para um dado tempo de cura, a fim de se verificar a influência da adição de emulsão no comportamento resiliente das misturas. De maneira análoga, foram agrupadas, em um mesmo gráfico, as superfícies referentes aos diferentes tempos de cura para um dado teor de emulsão, a fim de verificar a influência do processo de cura sobre o MR das misturas. Ressalta-se que os pontos de origem de todos os gráficos comparativos foram deslocados, de forma a facilitar a visualização das superfícies que descrevem o comportamento resiliente das diferentes misturas analisadas.

Serão discutidos nos itens que se seguem, com o auxílio dos gráficos, os resultados dos ensaios triaxiais dinâmicos para os solos naturais e suas misturas com emulsão asfáltica.

4.4.5.2 Solo A

A superfície determinada pela equação do modelo composto que descreve o comportamento resiliente do Solo A é apresentada na Figura 4.32.

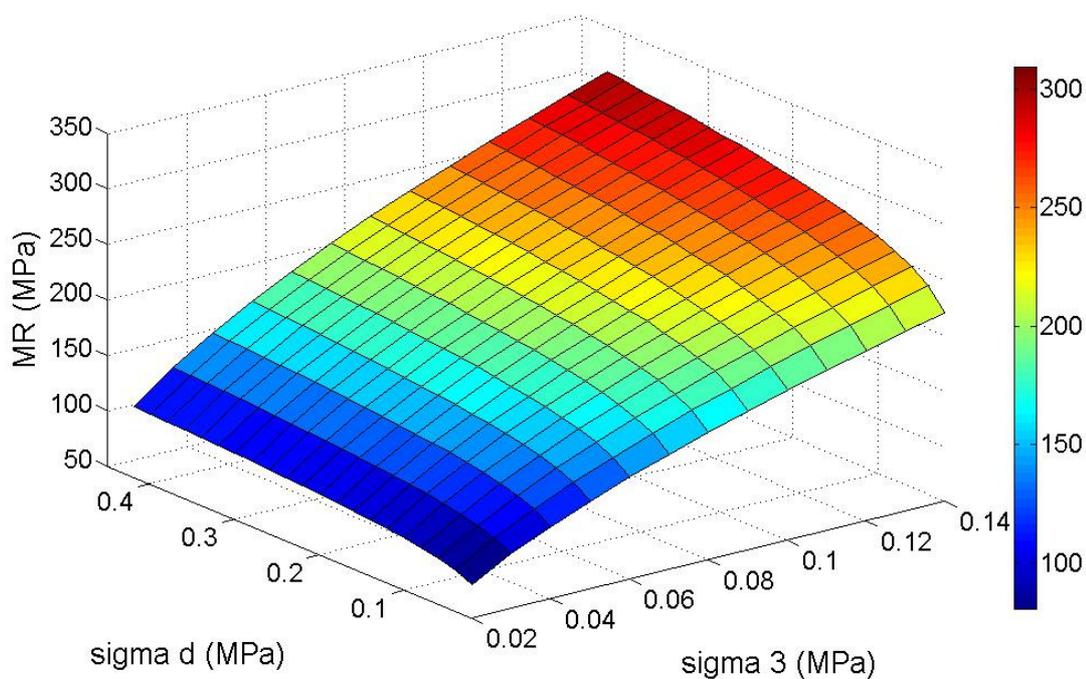


Figura 4.32 - Modelo composto para o módulo resiliente do solo A.

Avaliando-se a Figura 4.32, observa-se que o módulo resiliente do solo A é bastante susceptível às variações da tensão de confinamento e sofre uma menor influência da tensão desvio. Esse resultado é coerente com a textura do solo, uma vez que o comportamento observado é típico de solos granulares.

Com a finalidade de avaliar qualitativamente a influência do tempo de cura sobre o solo A e suas misturas com emulsão asfáltica, elaboraram-se os gráficos apresentados nas Figuras 4.33, 4.34, 4.35 e 4.36. Nestas figuras, as superfícies referentes aos três tempos de cura foram agrupadas para cada teor de emulsão, de forma que se apresentam quatro gráficos: um gráfico referente ao solo A puro (Figura 4.33), um referente às misturas deste solo com 2% de emulsão (Figura 4.34), outro referente às misturas com 5% de emulsão (Figura 4.35), e outro referente às misturas com o teor de 8% (Figura 4.36). Ressalta-se que a origem de cada gráfico representados nestas figuras foi deslocada, tendo em vista facilitar a visualização das superfícies.

A influência do processo de cura seca sobre o solo natural pode ser constatada por meio da análise da Figura 4.33. Após 7 dias de secagem se verifica que, para a maioria dos pares de tensão, essa amostra apresenta módulos mais elevados que a amostra análoga ensaiada imediatamente após a moldagem. Esse aumento nos valores do módulo pode ser justificado pela perda de umidade. O tempo de secagem tornou essa amostra de solo mais susceptível às variações da tensão desvio e menos dependente da tensão confinante.

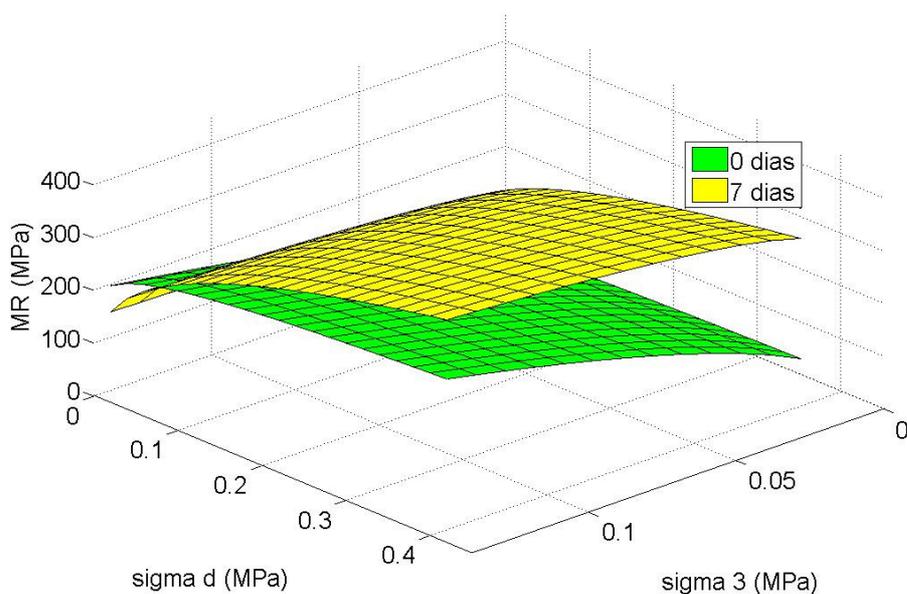


Figura 4.33 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo A puro.

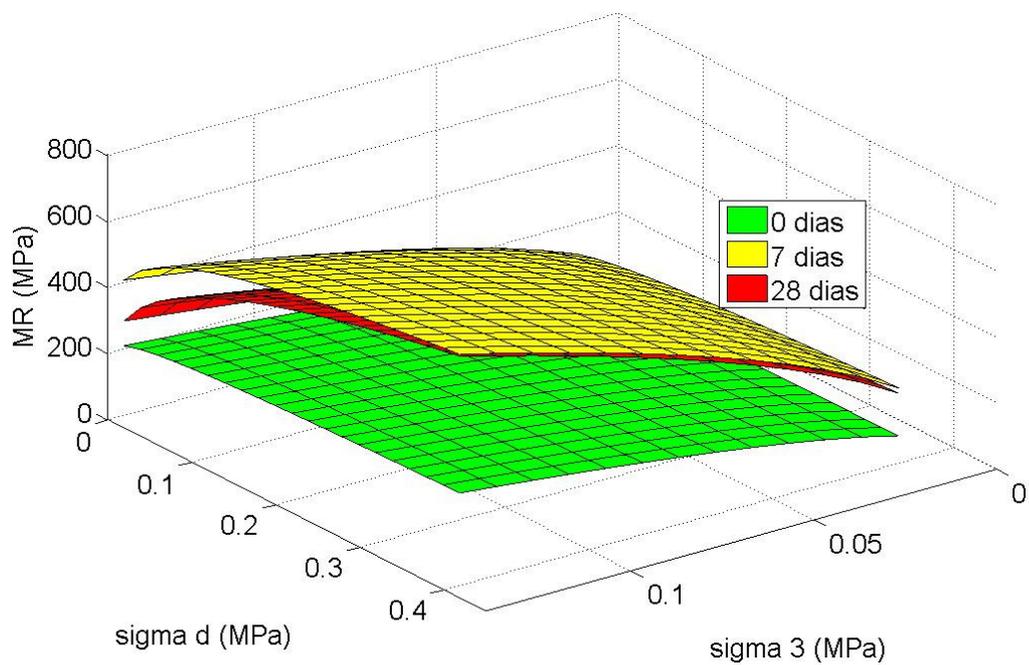


Figura 4.34 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo A + 2% de emulsão.

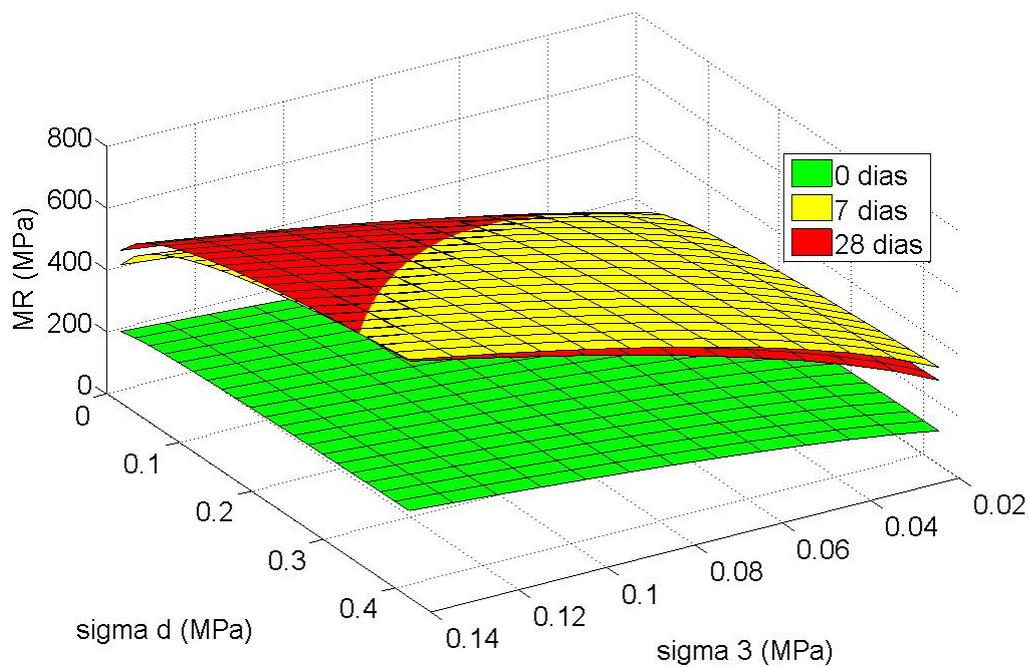


Figura 4.35 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo A + 5% de emulsão.

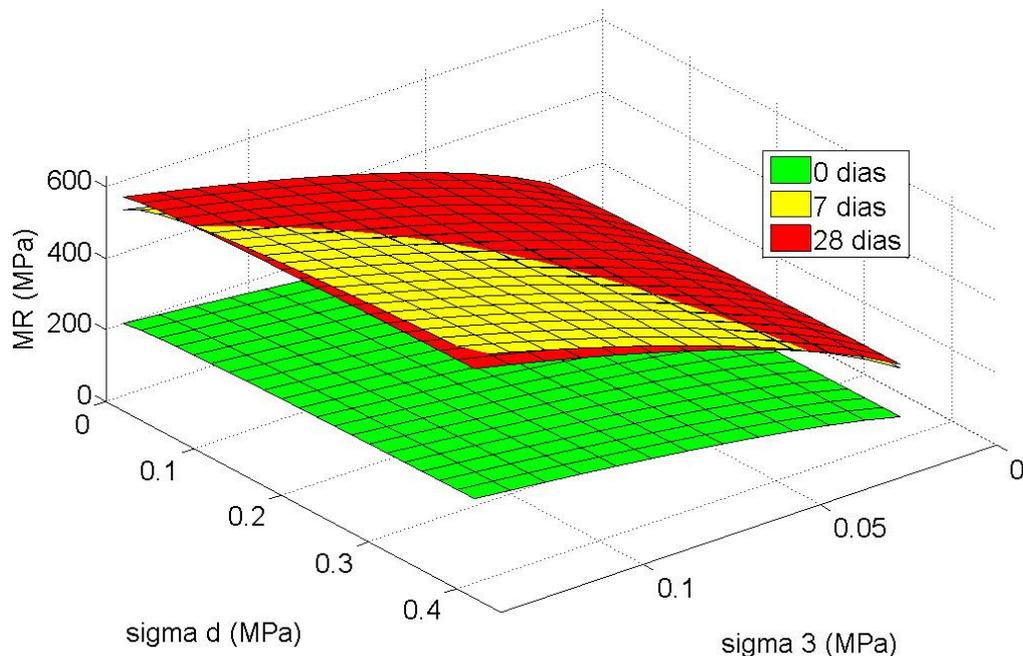


Figura 4.36 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo A + 8% de emulsão.

Com relação à influência da cura sobre o comportamento resiliente das amostras de solo-emulsão, notou-se que a cura tornou as misturas em todos os teores levemente mais dependentes da tensão desvio.

Analisando as Figuras 4.34, 4.35 e 4.36, constata-se a importância do tempo de cura para a melhoria do comportamento resiliente das misturas solo-emulsão. Verificou-se que a cura de 7 dias resultou em módulos de resiliência mais altos que os valores obtidos nos ensaios realizados logo após a compactação.

Com o prolongamento do tempo de cura para 28 dias, observou-se uma tendência à manutenção do comportamento observado para as misturas aos 7 dias de cura. Apenas para o teor de 2% de emulsão foi observada uma pequena redução nos valores do módulo, especialmente para baixas tensões desvio. É relevante citar que a RCS da mistura do solo A com o teor de 2% de emulsão também sofreu uma leve redução com o prolongamento do tempo de cura (ver item 4.4.2.2).

Tendo por objetivo analisar qualitativamente as modificações impostas aos solos pela adição dos diferentes teores de emulsão, buscou-se agrupar as superfícies por tempo de cura, de forma que são apresentados três gráficos para as misturas com o solo A: um referente aos ensaios executados imediatamente após a moldagem (Figura 4.37), um referente aos corpos submetidos à cura seca por 7 dias (Figura 4.38), e outro referente aos corpos submetidos à cura por 28 dias (Figura 4.39). Mais uma vez, foi necessário deslocar a origem dos gráficos, para que se pudesse observar as diferentes superfícies.

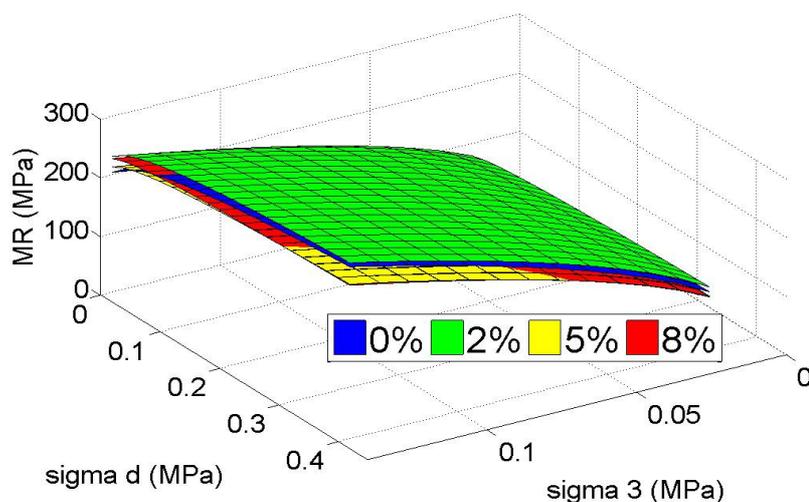


Figura 4.37 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo A com emulsão asfáltica ensaiadas imediatamente após a moldagem.

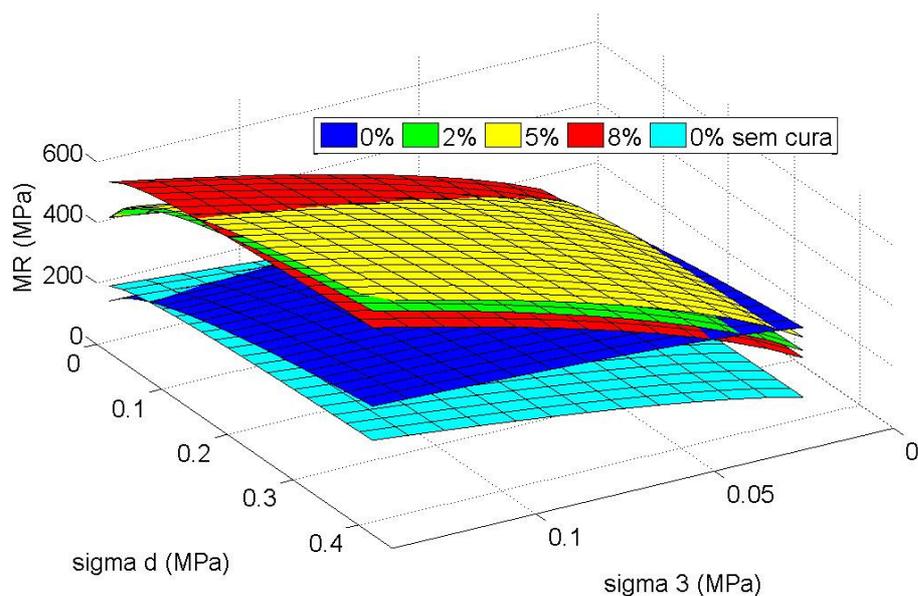


Figura 4.38 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo A com emulsão asfáltica ensaiadas após 7 dias de cura.

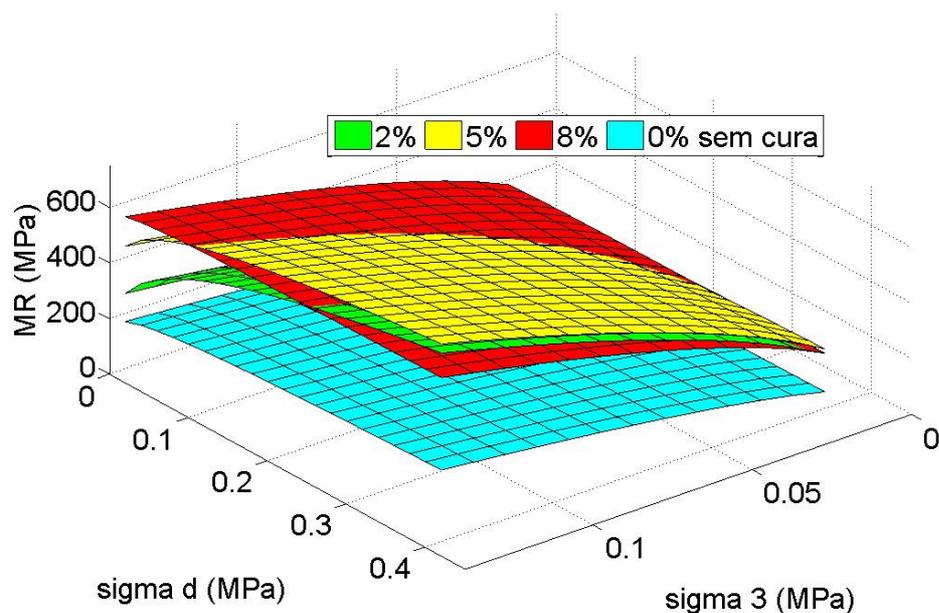


Figura 4.39 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo A com emulsão asfáltica ensaiadas após 28 dias de cura.

Nota-se, na Figura 4.37, que as superfícies referentes ao solo A puro e às suas misturas com emulsão asfáltica ensaiadas imediatamente após a moldagem apresentaram-se praticamente superpostas, o que indica que a adição de emulsão asfáltica no solo quase não exerce influência sobre o MR de maneira imediata.

Ao analisar a Figura 4.38, observa-se que a adição de emulsão promoveu aumentos substanciais nos valores de MR do solo em estudo após 7 dias de cura, se comparados aos valores referentes ao solo A puro ensaiado sob a mesma condição de cura. Este fenômeno indica que o melhoramento do comportamento resiliente do solo após a cura de 7 dias não se deve exclusivamente à perda de umidade, mas que a adição de emulsão também é responsável por este melhoramento.

As amostras estabilizadas mantiveram o padrão de comportamento característico de solos granulares: mostraram-se mais suscetíveis às variações da tensão de confinamento que às variações da tensão desvio.

Tabela 4.26 - Resultados de RTI e das umidades residuais das misturas do solo C com emulsão asfáltica.

Dias de cura	C + 2%			C + 5%			C + 8%		
	RTI (kgf/cm ²)	h (%)	% moldagem	RTI (kgf/cm ²)	h (%)	% moldagem	RTI (kgf/cm ²)	h (%)	% moldagem
0	0,00	15,31	100,00	0,00	14,38	100,00	0,00	13,58	100,00
7	3,40	7,24	47,28	3,06	6,26	43,53	1,66	6,24	45,94
28	1,57	4,20	27,43	2,00	3,20	22,25	1,30	3,09	22,75

RTI - resistência à tração indireta (kgf/cm²)

h - umidade residual em termos absolutos (%)

% moldagem - umidade residual em termos de percentual da umidade de moldagem

Ainda com relação aos resultados obtidos após cura de 7 dias, ressalta-se que as misturas estabilizadas, embora tenham obtido valores mais altos de MR que o solo puro, apresentaram-se mais dependentes das variações de tensão que o solo A natural.

Com relação à escolha de um teor ótimo que conduza aos máximos valores de MR para a cura de 7 dias, percebeu-se que as superfícies referentes às diversas misturas apresentam-se muito próximas. Isso indica que a adição dos diferentes teores de emulsão resulta em valores muito próximos de MR. Notou-se que, para esta condição de cura, a utilização do teor de 5% de emulsão conduziu a valores de MR levemente superiores aos outros teores, para a maioria dos pares de tensão.

Com o prolongamento do tempo de cura para 28 dias, é possível perceber a diferença de comportamento entre as misturas do solo A com os diferentes teores de emulsão asfáltica. Conforme pode ser observado na Figura 4.39, após 28 dias de secagem, as superfícies representativas do comportamento resiliente das diferentes misturas encontram-se mais distantes que aos 7 dias de cura.

Confirma-se a tendência da mistura do solo A com 5% emulsão em apresentar os valores mais altos de MR, para a maioria dos pares de tensão, indicando ser este o teor de emulsão ótimo para a obtenção do melhor comportamento resiliente do solo A. Encontrou-se outra relação entre os resultados de MR e de RCS para este solo: o teor ótimo indicado para a obtenção da máxima resistência à compressão coincide com o teor indicado para a obtenção do melhor comportamento resiliente da amostra em estudo (ver item 4.4.2.2).

4.4.5.3 Solo B

A Figura 4.40 apresenta a superfície que descreve o comportamento resiliente do solo B. Verifica-se que esta amostra apresenta valores de MR para a maior parte dos pares de tensão variando entre 100 e 200 MPa. Notou-se ainda a tendência à diminuição do módulo com o aumento da tensão desvio.

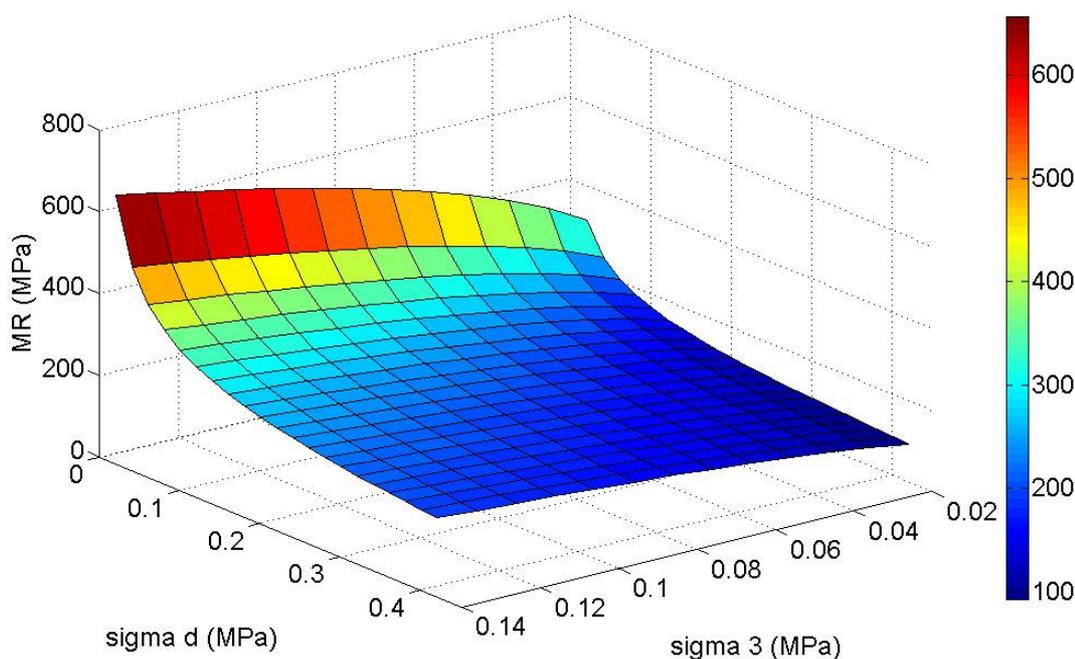


Figura 4.40 - Modelo composto para o módulo resiliente do solo B.

Os gráficos agrupados com relação ao tempo de cura, para cada teor de emulsão, são apresentados nas Figuras 4.41, 4.42, 4.43 e 4.44, relativas ao solo B puro, às misturas com 2% de emulsão, às misturas com 5% de emulsão e às misturas com 8% de emulsão, respectivamente.

Após a secagem pelo período de 7 dias, tanto o solo natural como suas misturas com emulsão mostraram-se menos susceptíveis às variações de tensão, além de terem alcançado valores mais elevados de MR, indicando que as amostras adquirem rigidez ao secarem.

Com prolongamento do tempo de cura para 28 dias, as misturas com os teores de 5% e 8% de emulsão apresentaram o mesmo padrão de comportamento resiliente que ao final dos 7 dias, porém foram observados incrementos nos valores de MR, para todas as

condições de carregamento. Para as misturas com 2% de emulsão o prolongamento do tempo de cura gerou módulos decrescentes com o aumento da tensão de confinamento.

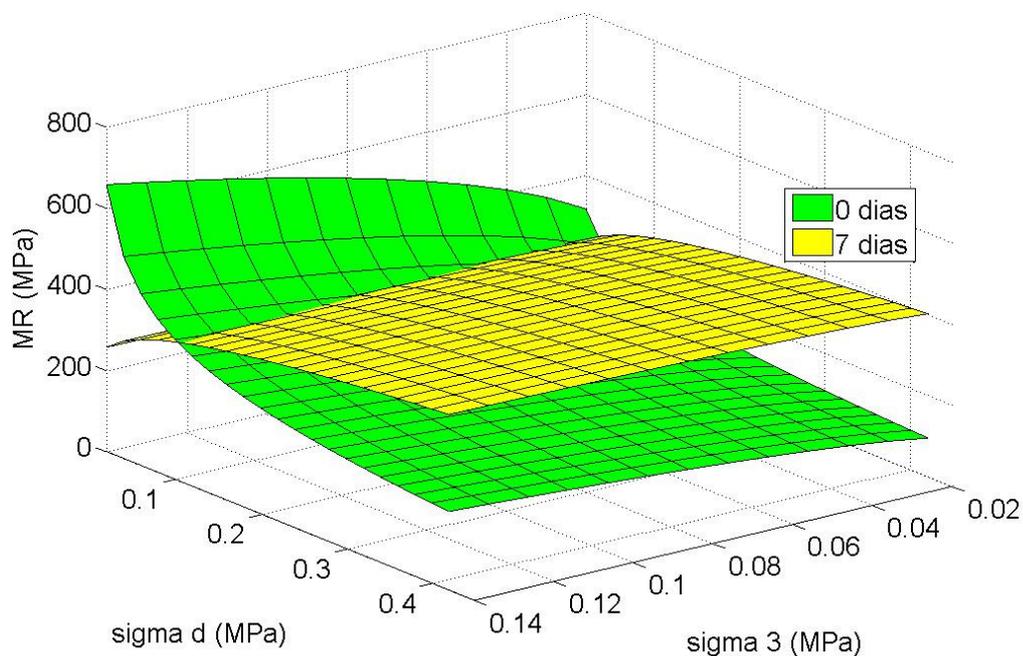


Figura 4.41 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo B puro.

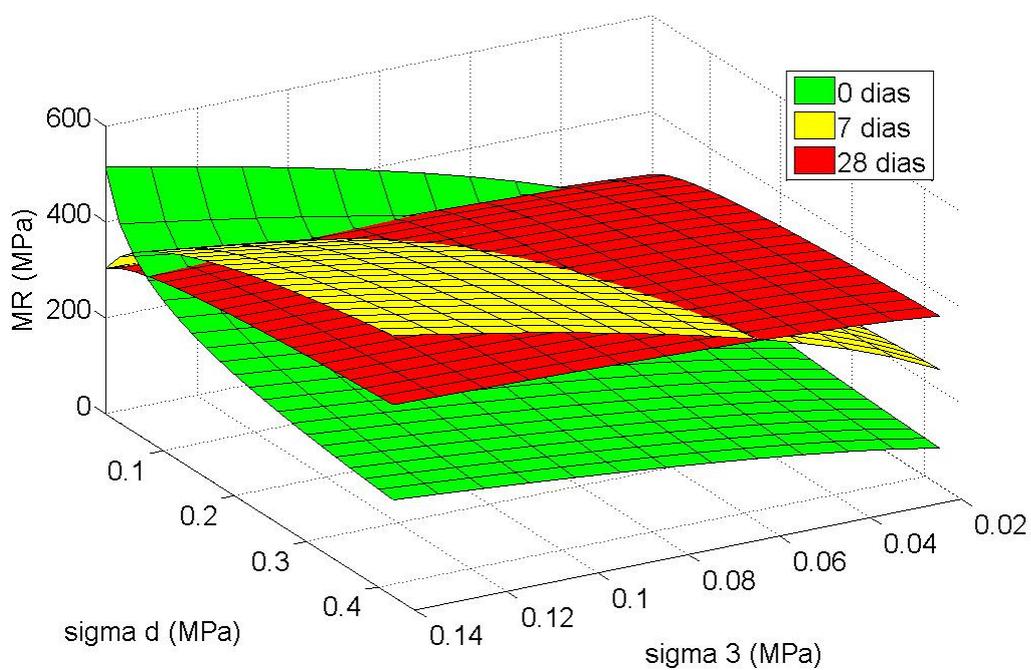


Figura 4.42 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo B + 2% de emulsão.

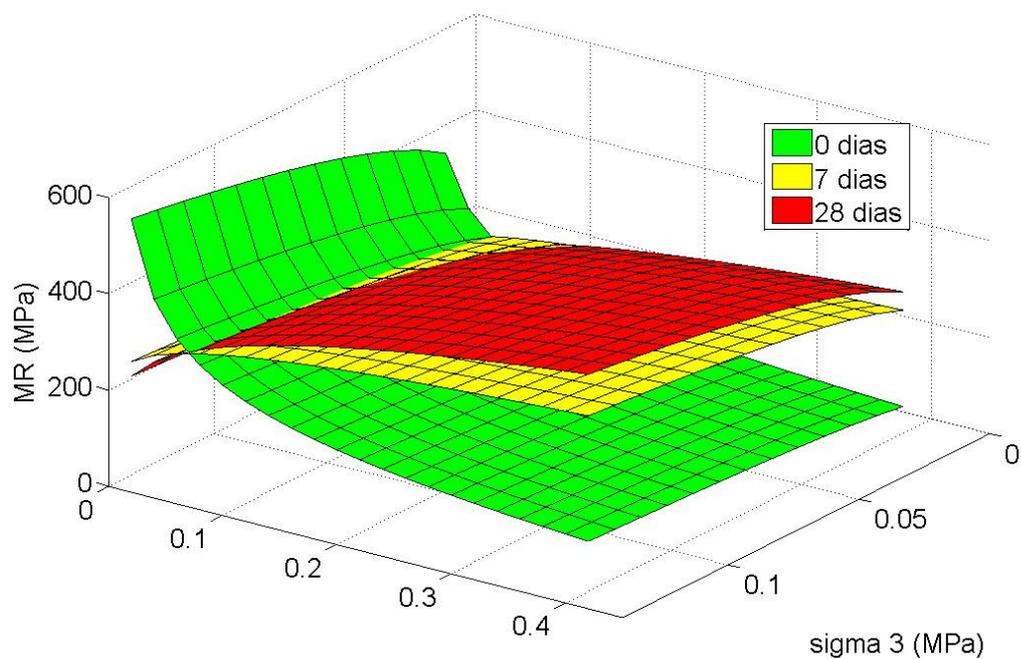


Figura 4.43 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo B + 5% de emulsão.

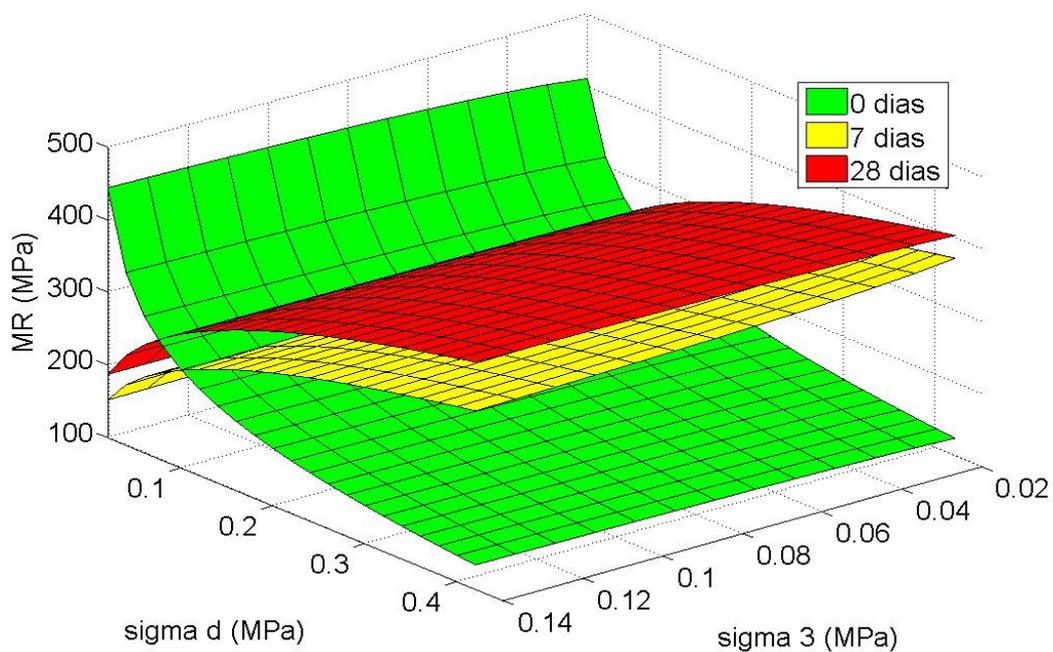


Figura 4.44 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo B + 8% de emulsão.

As Figuras 4.45, 4.46 e 4.47 apresentam os gráficos em que são agrupadas as superfícies referentes aos diferentes teores de emulsão, para cada tempo de cura. Essas figuras são referentes aos ensaios realizados imediatamente após a moldagem, após cura de 7 dias e após cura de 28 dias, respectivamente.

Com relação à adição de emulsão asfáltica ao solo B, os gráficos indicam que a emulsão promove pouca ou nenhuma influência sobre os valores de módulo de resiliência desta amostra, para todas as condições de cura. Verificou-se, inclusive, que aos 7 dias de cura os teores de 5% e 8% de emulsão resultam em módulos menores que os obtidos pelo solo natural, enquanto o teor de 2% tornou a amostra mais vulnerável à variação da tensão de confinamento. Esses resultados indicam, para a amostra de solo B, a não existência de um teor ótimo de emulsão que conduza ao seu melhor comportamento resiliente.

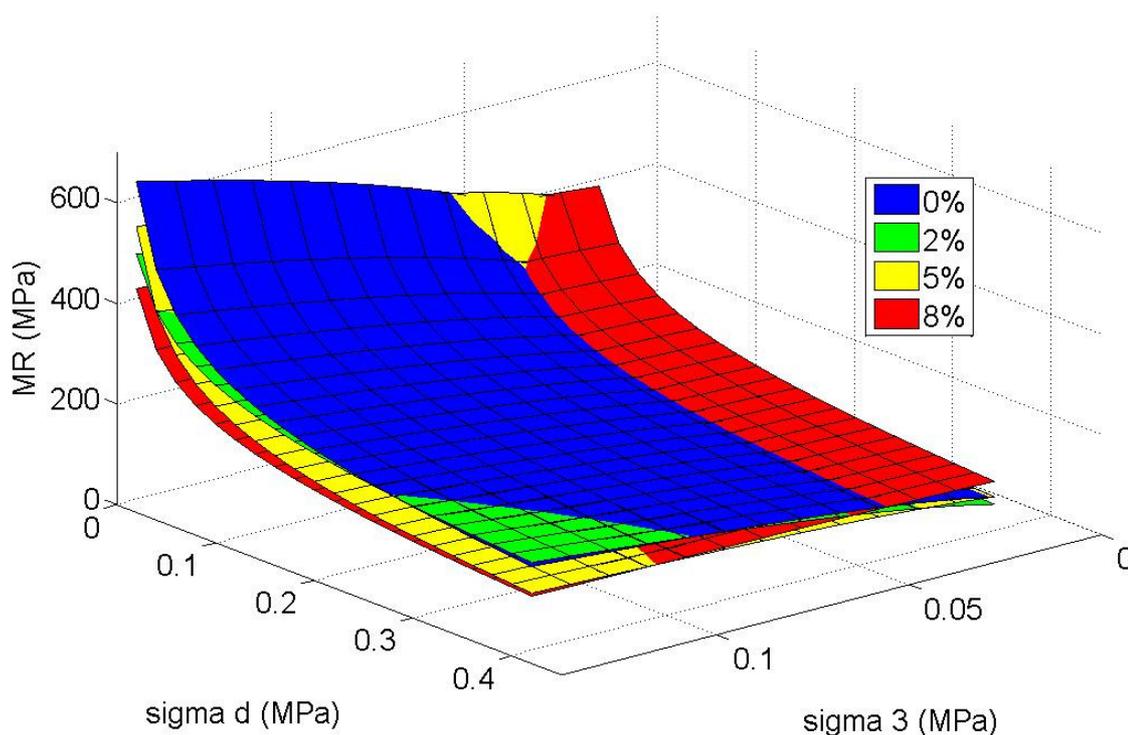


Figura 4.45 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo B com emulsão asfáltica ensaiadas imediatamente após a moldagem.

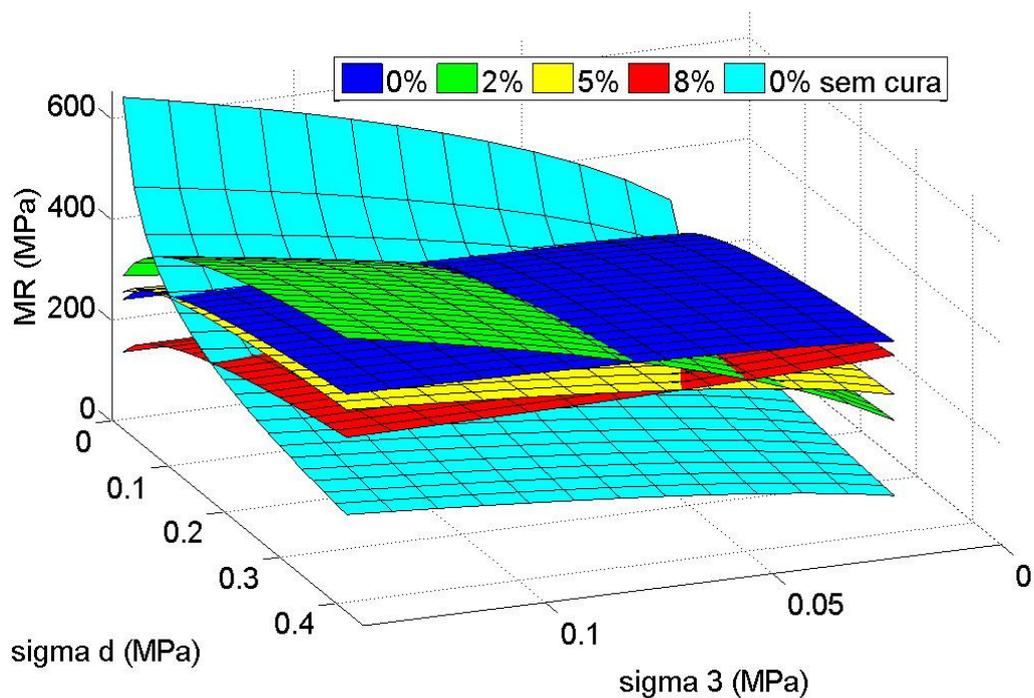


Figura 4.46 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo B com emulsão asfáltica ensaiadas após cura de 7 dias.

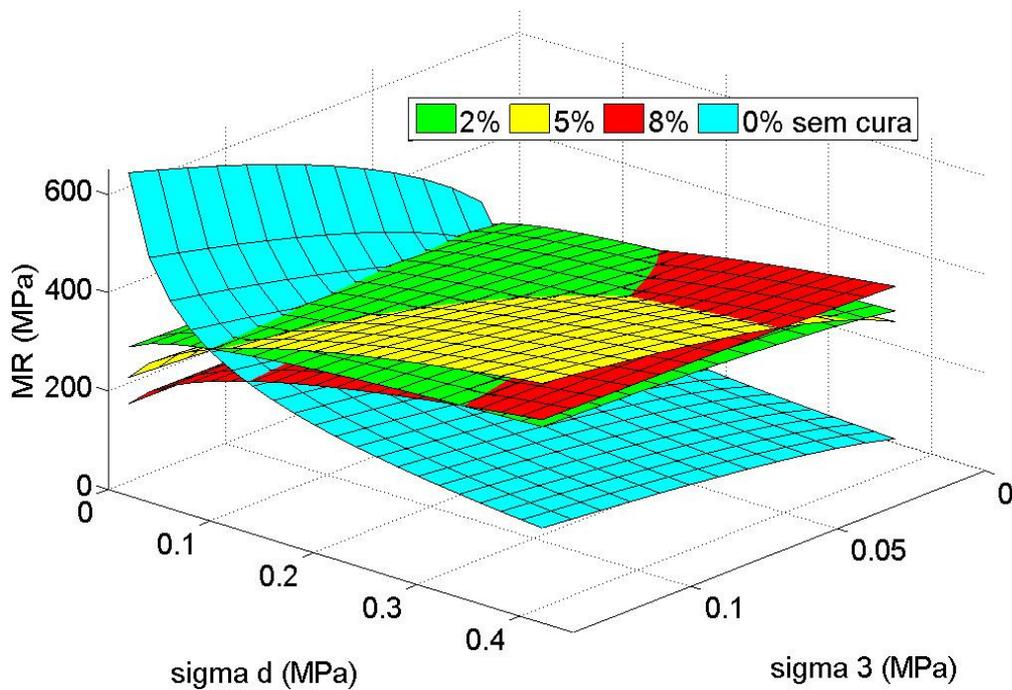


Figura 4.47 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo B com emulsão asfáltica ensaiadas após cura de 28 dias.

4.4.5.4 Solo C

A amostra de solo C se mostrou excessivamente deformável, de tal forma que os corpos de prova referentes ao solo puro e sua mistura com 5% de emulsão, sem cura, não toleraram nem mesmo a fase de condicionamento do ensaio triaxial dinâmico. Essas amostras se deformaram de tal forma que os LVDT's não foram mais capazes de realizar as medições dos deslocamentos, tornando impraticável a realização do ensaio de módulo de resiliência.

Na Figura 4.48 pode ser observado o aspecto do corpo de prova de solo C puro, ensaiado imediatamente após a moldagem. Para efeitos comparativos, nesta figura, o corpo de prova ensaiado é posto ao lado de seu cilindro de moldagem.



Figura 4.48 - Aspecto do corpo de prova do solo C puro ensaiado imediatamente após a moldagem.

A descrição do comportamento resiliente da amostra C somente pôde ser realizada após secagem ao ar por 7 dias. A Figura 4.49 ilustra a superfície que descreve o desempenho dessa amostra. Verifica-se que este solo apresenta comportamento típico de solo argiloso, uma vez que seus módulos são muito susceptíveis às variações de tensão desvio e pouco dependentes das tensões de confinamento.

Analisando as Figuras 4.50, 4.51 e 4.52, notou-se, mais uma vez, os grandes efeitos do processo de cura seca para o módulo das amostras estabilizadas deste solo. As amostras curadas das misturas solo-emulsão apresentaram um comportamento resiliente que tende a crescer como o aumento do nível de tensões, ao contrário do que foi observado nos ensaios realizados logo após a moldagem. O prolongamento do tempo de

cura para 28 dias resultou em módulos ainda mais altos que os valores observados ao final dos 7 dias de secagem.

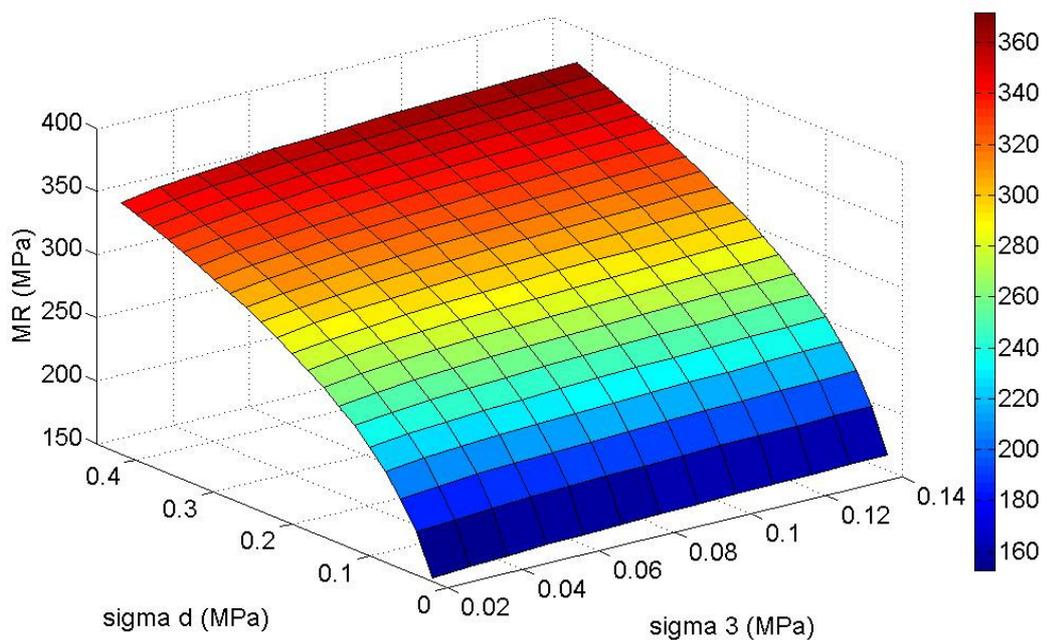


Figura 4.49 - Gráficos do MR do solo C puro após cura de 7 dias.

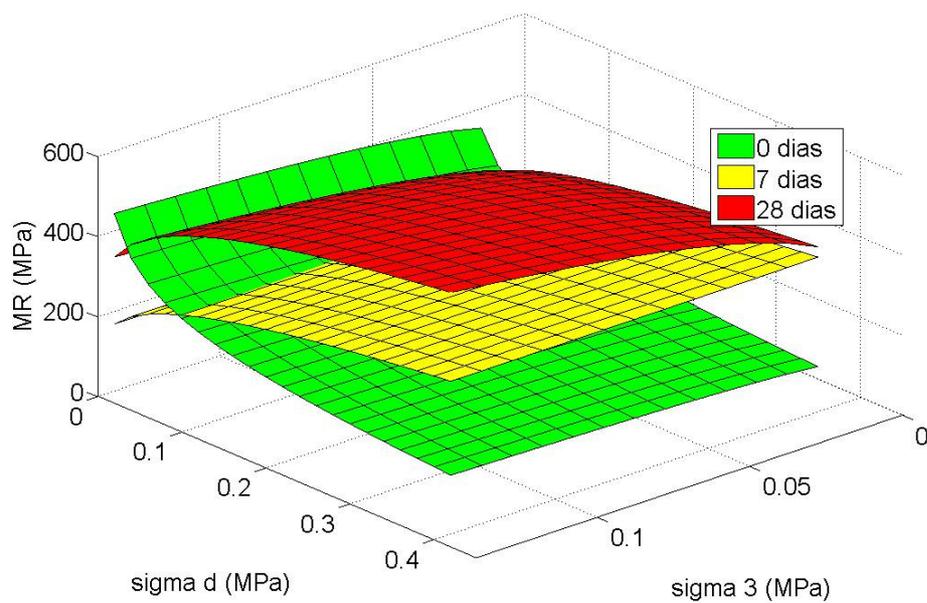


Figura 4.50 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo C + 2% de emulsão.

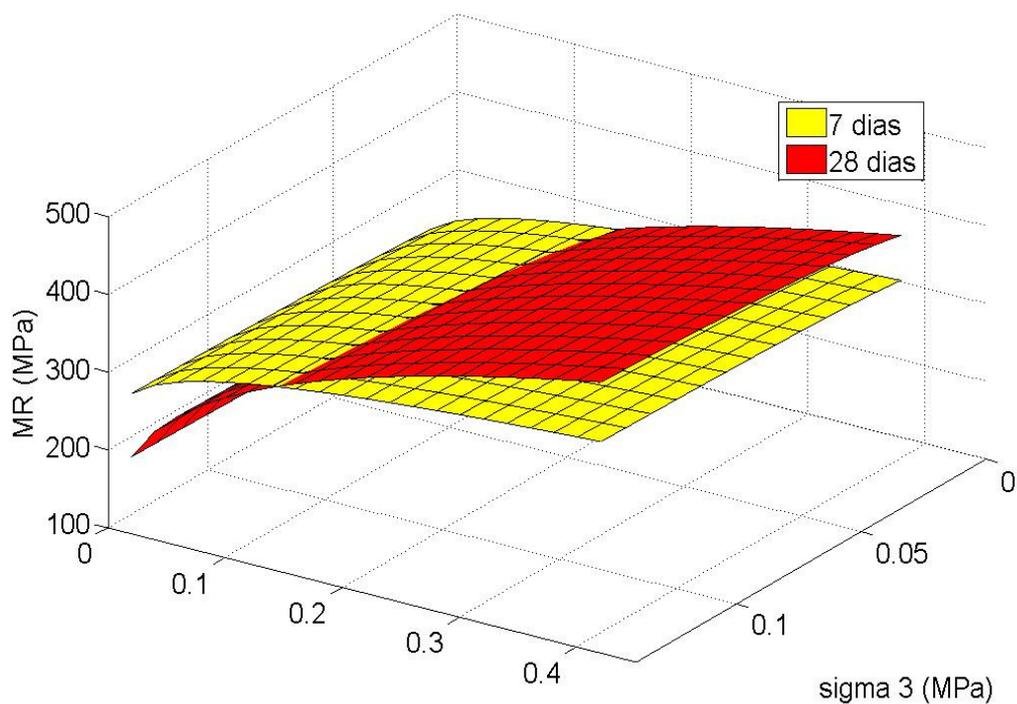


Figura 4.51 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo C + 5% de emulsão.

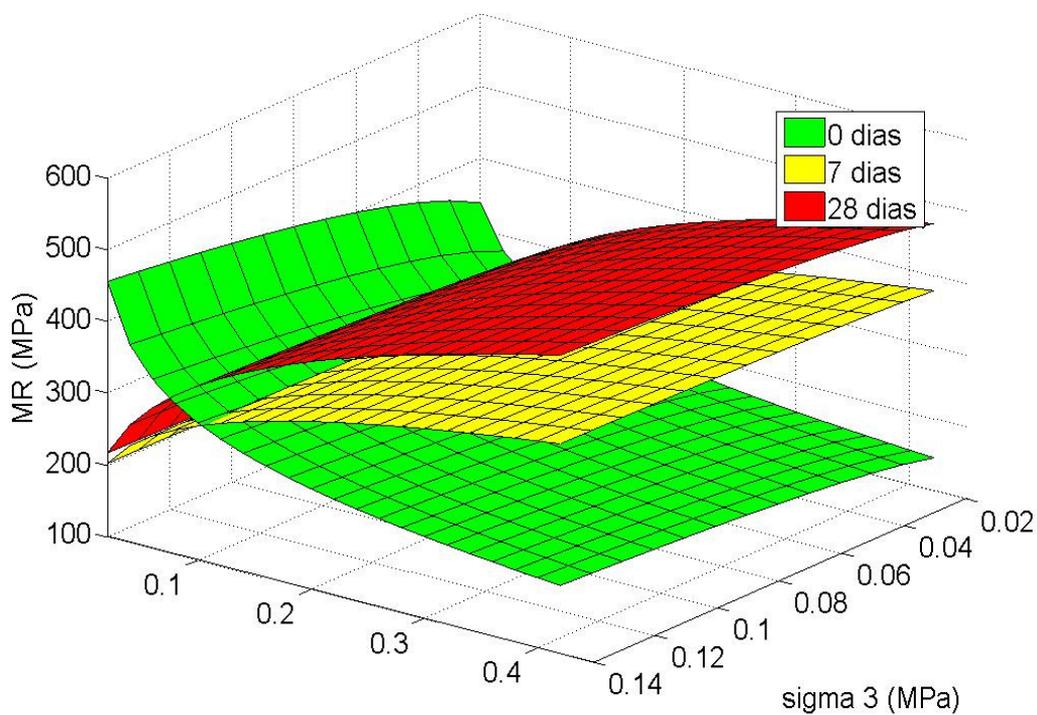


Figura 4.52 - Gráficos comparativos do MR sob diferentes condições de cura para o solo C + 8% de emulsão.

Para as misturas que toleraram o ensaio completo antes da cura (referentes aos teores de 2% e 8%), o MR tendeu a decrescer com o aumento da tensão desvio. Observou-se que os comportamentos resilientes das misturas aos teores de 2% e de 8% são descritos praticamente pela mesma superfície (ver Figura 4.53), o que indica a pouca influência imediata do aumento no teor de emulsão aplicada ao solo sobre o seu comportamento resiliente.

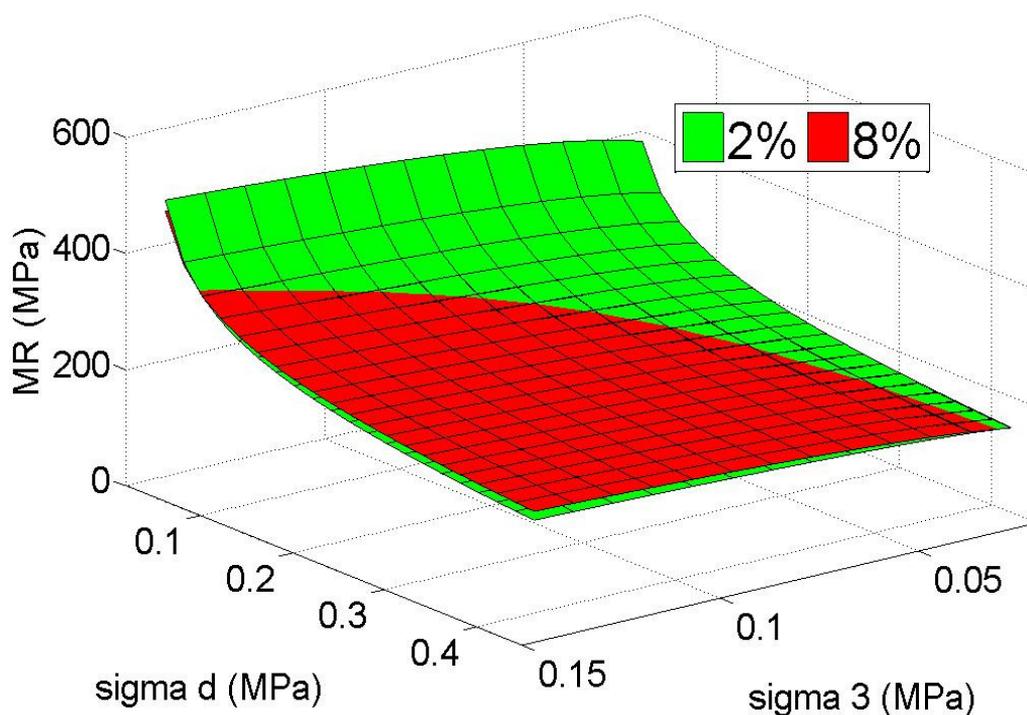


Figura 4.53 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo C com emulsão asfáltica ensaiados imediatamente após a moldagem.

Conforme se pode verificar na Figura 4.54, após 7 dias de cura foi possível a realização do ensaio de MR em todos os teores testados, inclusive com o solo puro. O solo e as misturas preparadas em todos os teores de emulsão apresentaram o padrão de comportamento típico de solos areno-argilosos: o MR é susceptível às variações da tensão desvio e dependem muito pouco da tensão confinante. Para este tempo de cura, com teor de 5% se obteve a mistura de comportamento mais estável.

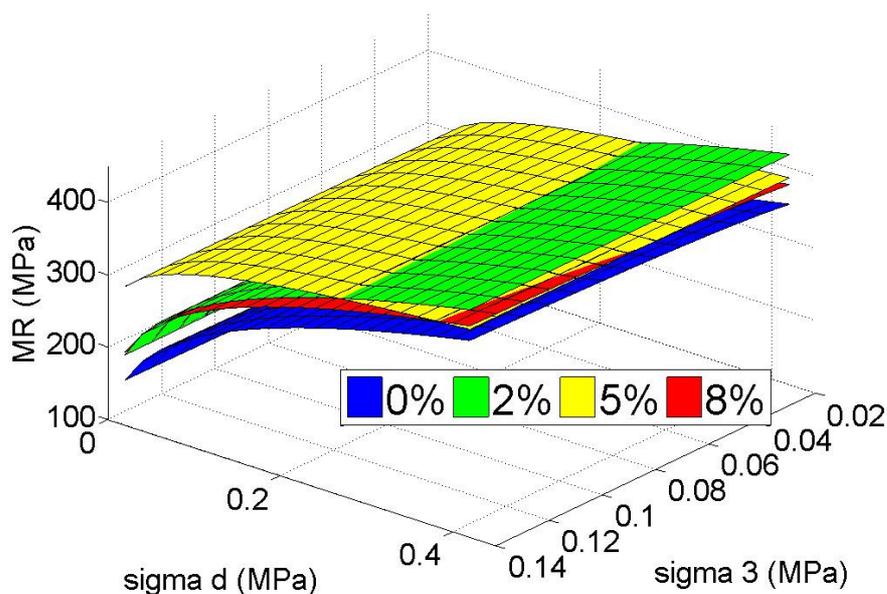


Figura 4.54 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo C com emulsão asfáltica ensaiados após 7 dias de cura.

Com o prolongamento da cura para 28 dias (Figura 4.55), observou-se que o teor de 2% apresentou o melhor comportamento resiliente, uma vez que essa mistura obteve os maiores valores de MR para praticamente todos os pares de tensão, além de ter se apresentado da forma bastante estável, pouco vulnerável às variações de tensão desvio e de confinamento.

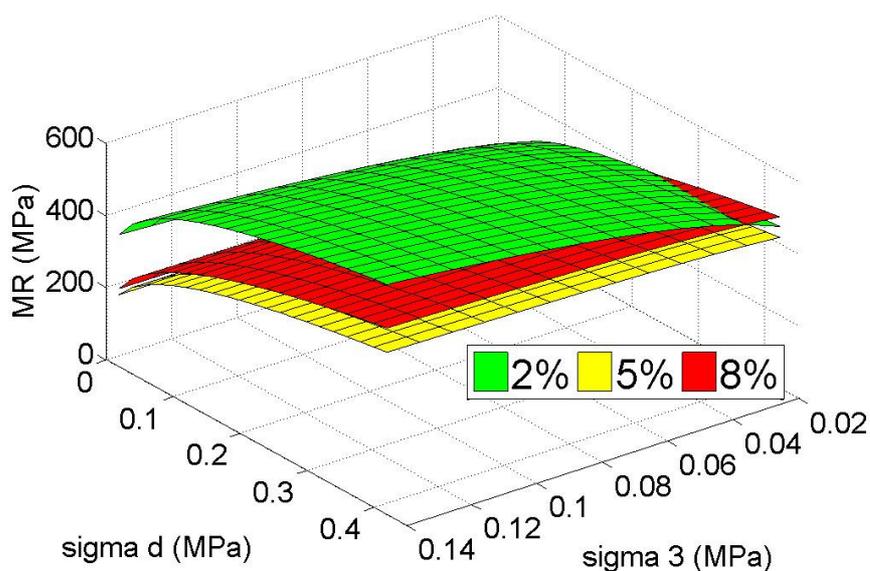


Figura 4.55 - Gráficos Comparativos de MR para as misturas do solo C com emulsão asfáltica ensaiados após 28 dias de cura.

4.4.5.5 *Efeitos da Estabilização Betuminosa Sobre o MR dos Solos Estudados*

Avaliando conjuntamente os resultados da análise qualitativa da estabilização betuminosa das três amostras de solo estudadas, foram realizadas as observações que se seguem:

- a) os ensaios de módulo de resiliência mostraram que a adição de emulsão asfáltica aos solos não provoca melhorias de forma imediata. Com a cura, havendo iniciado o processo de ruptura da emulsão e devido aos efeitos da secagem, obtém-se melhorias consideráveis nos valores de módulo de resiliência. Portanto, ficou evidenciada a necessidade do processo de cura para o melhoramento do desempenho do solo com relação à deformabilidade, sendo inteiramente desaconselhável a liberação imediata da via ao tráfego.
- b) a aplicação da emulsão asfáltica no solo arenoso (solo A), embora tenha resultado em maiores valores de MR para a maioria dos pares de tensão, tornou o módulo desta amostra mais dependente da tensão de confinamento que o solo puro.
- c) verificou-se que a adição da emulsão ao solo B praticamente não exerceu influência sobre o comportamento resiliente dessa amostra de solo, independente da condição de cura analisada.
- d) o solo C, mesmo sendo plástico, apresentou superioridade em termos de melhorias a partir da adição de emulsão asfáltica. Além de ter conseguido os maiores incrementos nos valores de MR, o solo C estabilizado apresentou um comportamento resiliente menos susceptível às variações no nível de tensões.
- e) com relação à determinação do teor ótimo de emulsão, notou-se que o teor indicado para a obtenção do melhor desempenho resiliente coincide com o teor indicado para a maior resistência à compressão simples das amostras, à exceção do solo B, para a qual não foi possível determinar o teor de emulsão ótimo que conduza ao melhor comportamento resiliente.

4.4.6 Determinação do Teor Ótimo de Emulsão para Cada Amostra de Solo

No âmbito desta pesquisa, buscou-se determinar o teor ótimo de emulsão para cada amostra de solo por meio da avaliação mecânica das diversas misturas solo-betume.

Uma vez que o objetivo deste trabalho é verificar a aplicabilidade da técnica solo-emulsão em camadas de base de rodovias de baixo volume de tráfego, procurou-se priorizar, na determinação do melhor teor, as características de importância para esta camada. Para as camadas de base de pavimentos as características de importância eleitas foram a resistência à compressão simples e o módulo de resiliência.

Nestas condições, verificou-se que o teor de emulsão que resultou na maior RCS e no melhor comportamento resiliente da amostra de solo identificada como A foi o teor de 5% (ver itens 4.4.2.2 e 4.4.5.2), sendo este o teor indicado como ótimo para a estabilização desta amostra de solo. Vale lembrar que este teor não resulta, para este solo, na maior resistência à tração indireta (conforme foi observado no item 4.4.3.1). Ressalta-se ainda que não foi observado um teor ótimo que gerasse um melhor ISC para o solo A (item 4.4.4.1).

Para o solo B, notou-se que o teor de 2% de emulsão foi o teor ótimo indicado pela resistência à compressão simples e pela resistência à tração indireta (ver itens 4.4.2.3 e 4.4.3.2), enquanto os ensaios de ISC e de módulo de resiliência não indicaram a existência de um teor ótimo para esta amostra de solo (conforme explanado nos itens 4.4.4.2 e 4.4.5.3). Elegeu-se, baseando-se nos ensaios de ruptura (RCS e RTI), o teor de 2% de emulsão como teor ótimo para a estabilização do solo B.

Para a amostra C, todos os ensaios confirmaram a superioridade do teor de 2% de emulsão sobre os demais teores (ver itens 4.4.2.4, 4.4.3.3, 4.4.4.3 e 4.4.5.4), indicando ser este o teor ótimo para a estabilização da amostra de solo C.

Os parâmetros de resistência das misturas dos solos com seus teores ótimos de emulsão foram escolhidos após cura seca ao ar pelo período de 7 dias. Observou-se que esse tempo de cura é suficiente para que haja o processo de ruptura da emulsão e para que a maioria das misturas atinja seu melhor desempenho.

A Tabela 4.27 apresenta os parâmetros de resistência arbitrados para essas misturas. Os parâmetros considerados são os valores de RCS, RTI, ISC e os parâmetros do modelo composto que descreve o comportamento resiliente das amostras.

Tabela 4.27 - Parâmetros de resistência das amostras de solo puras e estabilizadas em seus teores ótimos.

Amostra	RCS (MPa)	RTI (kgf/cm ²)	ISC (%)	Parâmetros Modelo Composto		
				K ₁	K ₂	K ₃
Solo A + 5%	0,58	0,77	23	2236	0,466	0,179
Solo B + 2%	2,43	2,85	17	1451	0,416	0,191
Solo C + 2%	3,07	3,40	31	507	-0,005	0,243

4.4.7 Avaliação Mecânica da Distribuição em Gradiente da Emulsão Asfáltica

A avaliação mecânica das misturas solo-emulsão com a distribuição da emulsão asfáltica em um gradiente decrescente com a profundidade foi realizada com o intuito de testar, em laboratório, a experiência realizada em campo por Santana (1976), relatada no item 2.4.1, do Capítulo 2.

A motivação para a realização desta análise foi verificar se a distribuição da emulsão asfáltica em gradiente tornaria as bases não revestidas de solo-emulsão mais resistentes aos rigores do tráfego. Para tanto, corpos de prova com teor de emulsão decrescente com a profundidade foram submetidos à avaliação da resistência mecânica (tratada neste item) e à avaliação da resistência ao desgaste, a ser apresentada no item 4.5 do presente capítulo.

A avaliação da resistência mecânica das misturas com distribuição em gradiente consistiu dos ensaios de resistência à compressão simples e do módulo de resiliência. Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e de ISC foram descartados devido à dificuldade de confecção dos corpos de prova com teor variável de emulsão.

Os corpos de prova submetidos aos ensaios de RCS e MR foram moldados sob a energia intermediária de compactação, seguindo o procedimento apresentado no item 3.3.4, do Capítulo 3, e curados ao ar pelo período de 7 dias. O teor de emulsão empregado na distribuição em gradiente foi o teor ótimo de cada solo, determinado no

item 4.4.6. O aspecto dos corpos de prova em gradiente referentes às três amostras de solo estudadas é apresentado na Figura 4.56.



a. Solo A

b. Solo B

c. Solo C

Figura 4.56 - Aspecto dos corpos de prova dos solos A, B e C estabilizados com distribuição de emulsão em gradiente

Nos itens a seguir, é realizada uma avaliação dos resultados de RCS e MR obtidos pelos corpos de prova com distribuição da emulsão em gradiente.

4.4.7.1 *Resistência à Compressão Simples*

Os corpos de prova com distribuição da emulsão em gradiente apresentaram padrão de ruptura distinto do padrão observado para os corpos de prova dos solos puros e das misturas com distribuição homogênea, apresentado no item 4.4.2, Figura 4.12.

Enquanto as trincas nos corpos de prova convencionais se originam na região central da amostra, a ruptura das amostras com distribuição em gradiente se originam no topo do corpo de prova, ou seja, na região onde há uma maior concentração de emulsão. A progressão da ruptura nas amostras em gradiente ocorre na direção vertical, no sentido do topo para a base do corpo de prova, conforme pode ser observado na Figura 4.57.



Figura 4.57 – Exemplo de padrão de ruptura das amostras em gradiente.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples nos corpos de prova convencionais mostraram que existe um teor ótimo de emulsão que resulta em uma máxima RCS e que a aplicação da emulsão ao solo em teores maiores que o ótimo resulta em misturas mais frágeis. Neste fenômeno reside a justificativa para o fato da ruptura das amostras em gradiente se originarem no topo do corpo de prova: nesta região a concentração de emulsão é maior que o teor ótimo, logo, sua resistência tende a ser menor que o restante do corpo de prova.

Seguindo este raciocínio, acredita-se que a resistência à compressão das amostras com distribuição em gradiente tende a ser limitada pela resistência do topo do corpo de prova, uma vez que a ruptura ocorrerá nesta região. Desta forma, há uma suspeita de que a RCS das misturas em gradiente seja menor que a RCS das misturas convencionais, para um mesmo teor de emulsão.

Os resultados dos ensaios de RCS das amostras em gradiente dos três solos são apresentados na Figura 4.58. Para efeitos de comparação, os resultados da RCS referentes aos solos puros e às misturas convencionais com emulsão, após cura ao ar por 7 dias, são apresentados no mesmo gráfico.

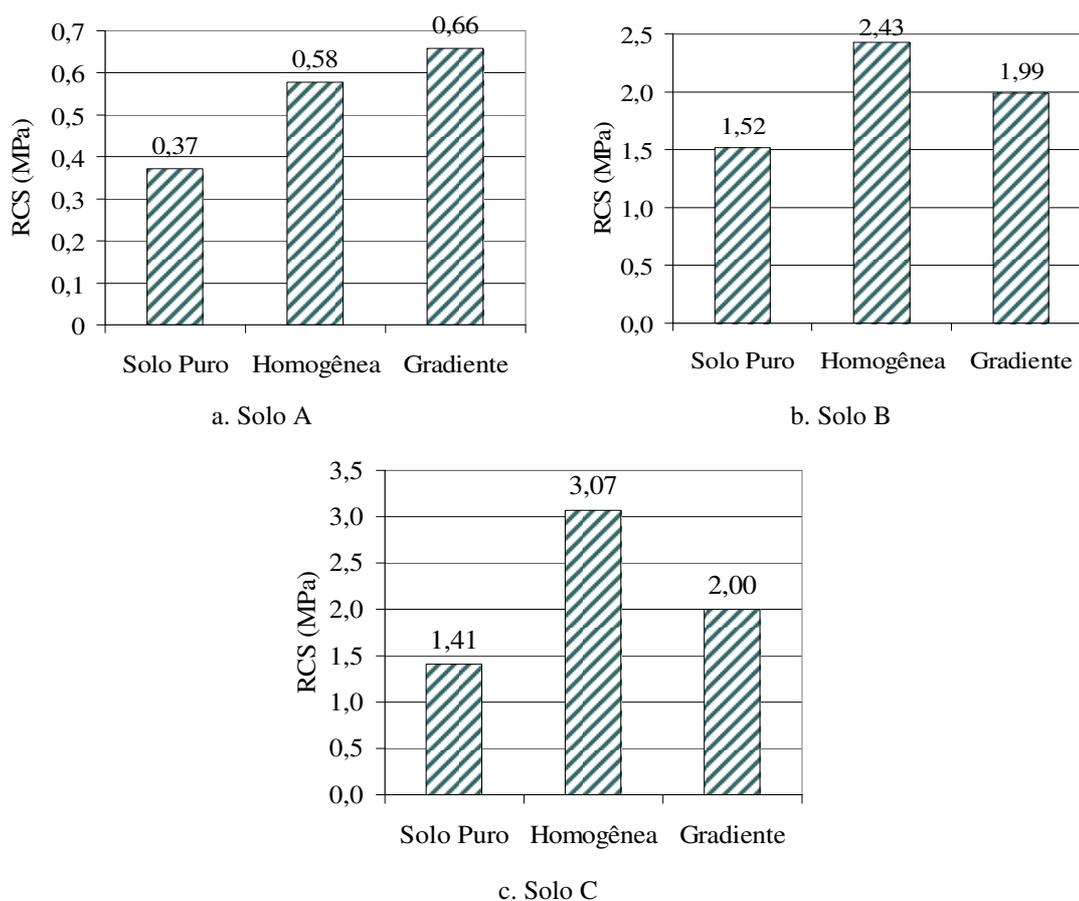


Figura 4.58 - Resistência à compressão simples dos solos A, B e C puros e com distribuição homogênea e em gradiente dos teores ótimos de emulsão.

Os resultados indicaram que a redução na RCS devido à distribuição em gradiente ocorreu para os solos B e C. As amostras do solo B com distribuição em gradiente apresentaram RCS 18% menores que as amostras com distribuição homogênea. Para a amostra de solo C a redução da resistência foi mais acentuada: a distribuição em gradiente resultou em uma RCS 30% menor que a distribuição convencional.

Para o solo A, no entanto, observou-se que a distribuição em gradiente gerou corpos de prova levemente mais resistentes que a distribuição convencional: as amostras em gradiente apresentaram um crescimento de 14% na RCS, se comparadas às amostras em distribuição homogênea.

A explicação para o aumento da resistência à compressão simples com a distribuição em gradiente desta amostra de solo pode encontrar-se na umidade residual

dos corpos de prova. No item 4.4.2.5 mostrou-se que a RCS das misturas do solo A com emulsão asfáltica tende a crescer exponencialmente com a perda de umidade. Verificou-se a umidade residual das amostras do solo A estabilizadas em gradiente e observou-se que estas apresentavam uma umidade residual média de 0,59%, ou seja, cerca de 21% mais secas que as amostras estabilizadas convencionalmente (0,75%), o que tornaria essas amostras mais resistentes que as amostras estabilizadas de forma homogênea.

É importante ressaltar ainda que os corpos de prova dos solos A, B e C estabilizados com teor variável de emulsão obtiveram resistências maiores que os solos puros, embora os valores obtidos sejam inferiores à resistência dos solos estabilizados convencionalmente. As amostras estabilizadas em gradiente dos solos A, B e C atingiram aumentos na RCS da ordem de 78%, 31% e 42%, respectivamente, se comparadas às resistências das amostras puras de solo.

4.4.7.2 *Módulo de Resiliência*

Seguindo a mesma linha de pensamento explanada no item 4.4.5.1 para a avaliação do módulo de resiliência das misturas testadas neste trabalho, optou-se por utilizar o modelo composto e a análise visual comparativa para a avaliação da influência da distribuição em gradiente sob o módulo de resiliência das amostras de solo.

As superfícies que descrevem o comportamento resiliente das amostras estabilizadas em gradiente dos solos A, B e C são apresentadas na Figura 4.59, 4.60 e 4.61, respectivamente, enquanto os parâmetros encontrados para o modelo composto são apresentados na Tabela 4.28. Com o objetivo de verificar as variações ocorridas no comportamento resiliente dos solos, decorrentes da aplicação da emulsão asfáltica em gradiente, foram agrupadas em um mesmo gráfico as superfícies que descrevem o comportamento resiliente do solo puro, do solo estabilizado com distribuição homogênea e do solo estabilizado com distribuição em gradiente.

Tabela 4.28 - Parâmetros do modelo composto para as amostras dos solos A, B e C estabilizadas com distribuição da emulsão em gradiente.

Amostra	K1	K2	K3	R ²
Solo A + 5% Gradiente	2716	0,587	0,191	0,96
Solo B + 2% Gradiente	285,6	-0,00078	0,191	0,33
Solo C + 2% Gradiente	582,7	0,065	0,317	0,91

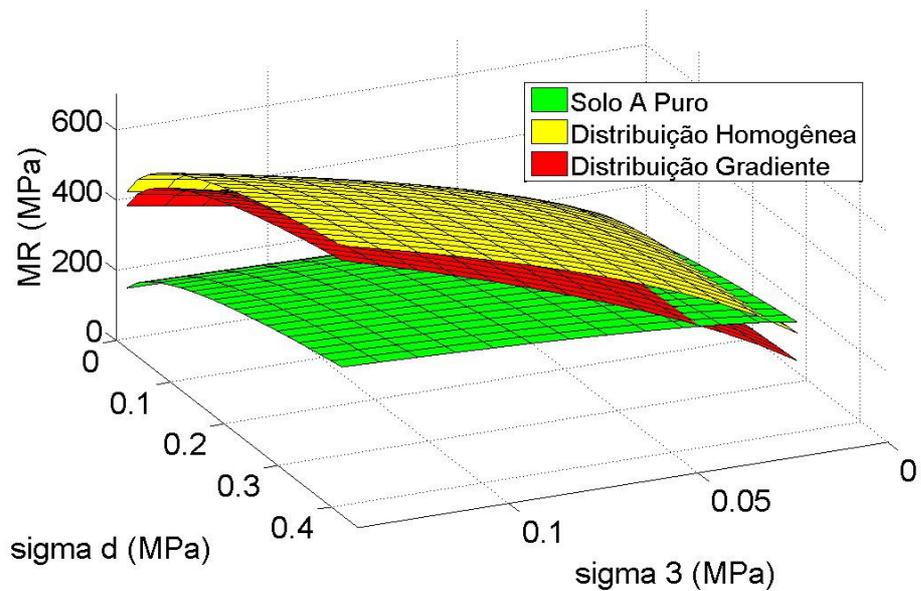


Figura 4.59 - Gráficos comparativos de MR do solo A puro e estabilizado com distribuição de emulsão homogênea e em gradiente.

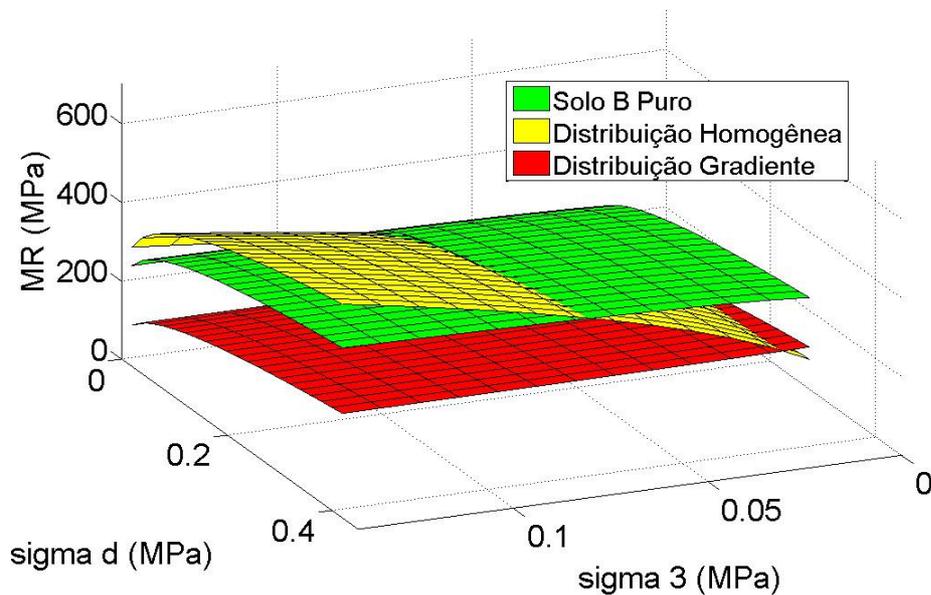


Figura 4.60 - Gráficos comparativos de MR do solo B puro e estabilizado com distribuição de emulsão homogênea e em gradiente.

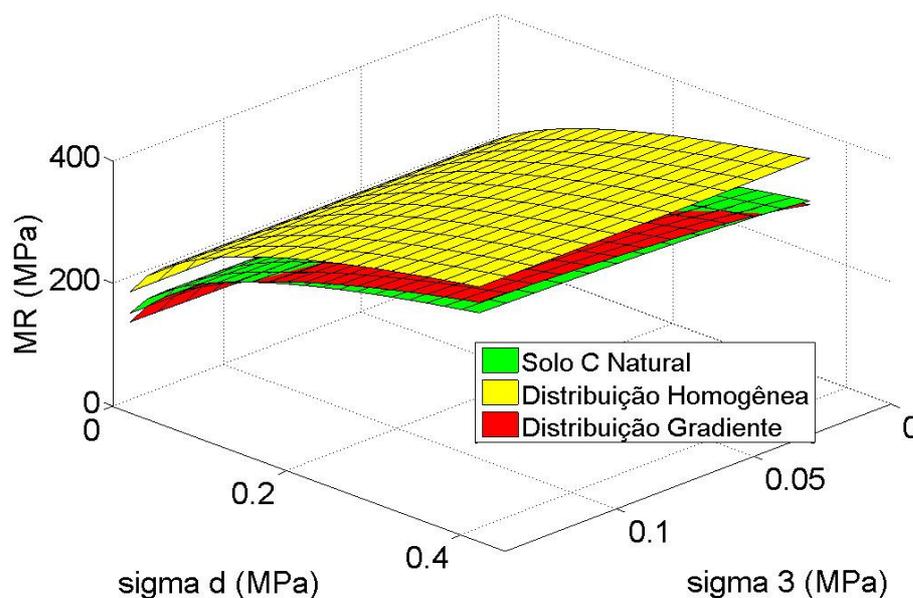


Figura 4.61 - Gráficos comparativos de MR do solo C puro e estabilizado com distribuição de emulsão homogênea e em gradiente.

Para o solo A, observou-se que o corpo de prova com distribuição em gradiente apresenta a mesma tendência de comportamento resiliente que a amostra estabilizada com distribuição homogênea, ou seja, o MR é susceptível às variações na tensão de confinamento, mas depende pouco da tensão desvio. Verificou-se que distribuição em gradiente resultou em valores de MR um pouco mais baixos que os valores obtidos pela distribuição homogênea, mas que esses valores são maiores que os obtidos pelo solo puro para a maior parte do pares de tensão.

Para a amostra de solo B, a distribuição da emulsão em gradiente mostrou-se bastante prejudicial ao comportamento resiliente: a distribuição variável de emulsão resultou em valores de módulos de resiliência muito inferiores aos valores obtidos pelo solo puro, para todos os pares de tensão. Com relação à tendência de comportamento resiliente, observou-se que a amostra em gradiente mostrou-se estável, pouco dependente das tensões de confinamento e desvio.

Com relação ao solo C, verificou-se que a amostra com distribuição em gradiente é descrita praticamente pela mesma superfície que o solo puro, indicando que aplicação variável de emulsão anula os efeitos da estabilização, à luz dos ensaios de MR.

4.4.7.3 *Efeitos da Distribuição da Emulsão em Gradiente Sobre o Comportamento Mecânico das Misturas Solo-Emulsão*

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e de módulo de resiliência indicaram que as misturas solo-emulsão com a distribuição em gradiente, referentes a cada amostra de solo, apresentam comportamentos mecânicos distintos.

As amostras que sofreram menor perda no comportamento mecânico foram as amostras referentes ao solo A. A estabilização em gradiente dessas amostras resultou em aumento na RCS e numa pequena redução no módulo de resiliência, se comparadas aos resultados da estabilização convencional. Esse resultado indica que a aplicação em gradiente produz pouca variação no comportamento mecânico das amostras do solo A estabilizadas, sendo este um indicativo da possibilidade de aplicação desta técnica, para o caso desse material.

Entretanto, para as amostras B e C a aplicação em gradiente resultou em grande prejuízo às propriedades mecânicas. Estas amostras sofreram redução na resistência à compressão simples, se comparadas às amostras estabilizadas convencionalmente, e o comportamento resiliente mostrou-se similar ou inferior ao comportamento do solo puro. Estes dados indicam que, à luz da avaliação mecânica, não se deve aplicar a emulsão asfáltica em gradiente aos solos B e C, em camadas de base de pavimentos, posto que este procedimento resulta em materiais de deformabilidade igual ou superior aos solos em seus estados naturais.

4.5 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO E AO DESGASTE

Durante a realização desta pesquisa surgiu o interesse em se verificar a potencialidade da aplicação de solos estabilizados com emulsão em camadas de revestimento de pavimento, ou ainda em camadas de base não revestidas. Visando a utilização da técnica solo-emulsão em camadas que serão submetidas diretamente às ações do tráfego, torna-se importante investigar a capacidade dessas misturas de resistirem aos esforços abrasivos gerados pelo tráfego.

Duque Neto (2004), ao estudar a durabilidade da técnica antipó, propôs uma forma alternativa de avaliar a resistência ao desgaste de superfícies que serão expostas

ao tráfego. Essa proposta consiste dos ensaios de LWT e WTAT adaptados, conforme foi apresentado no item 3.3.6, do Capítulo 3 do presente trabalho.

Posteriormente, a técnica proposta por Duque Neto (2004) foi utilizada por Thuller (2005), para a avaliação da durabilidade do tratamento superficial e por Miceli Jr (2006) e Soliz (2007), para a avaliação da resistência ao desgaste das superfícies de misturas solo-emulsão.

Nesta pesquisa, foram submetidas aos ensaios adaptados de LWT e WTAT as amostras de solos puros e suas misturas estabilizadas em seus respectivos teores ótimos, com distribuição convencional do teor de emulsão, e com distribuição em gradiente. Os corpos de prova foram curados ao ar pelo período de 7 dias, visando garantir a ruptura da emulsão asfáltica.

Para a moldagem dos corpos de prova e a execução dos ensaios foram seguidos os procedimentos apresentados nos itens 3.3.6.1 (para o ensaio de LWT) e 3.3.6.2 (para o ensaio de WTAT) do Capítulo 3.

São discutidos nos item a seguir os resultados encontrados para os ensaios adaptados de LWT e WTAT.

4.5.1 LWT

Com relação aos critérios de avaliação, a proposta de Duque Neto (2004) consiste, para o ensaio de LWT adaptado, de uma avaliação visual e da medição do afundamento durante o ensaio. Para cada um desses critérios atribui-se uma nota, e essas notas deverão ser somadas para que se atribua a avaliação final do material ensaiado.

Pelo rigor do ensaio e dos requisitos para as notas, Miceli Jr (2006) entendeu que a avaliação pudesse ser feita de forma totalmente quantitativa, por meio da medição da deformação vertical, excluindo-se o critério da avaliação visual definido por Duque Neto (2004). Em concordância com Miceli Jr (2006), e com o intuito de minimizar a subjetividade para a obtenção dos resultados, decidiu-se que os resultados dos ensaios de desgaste realizados nesta pesquisa consistirão da medida do afundamento, para o ensaio de LWT.

Miceli Jr (2006) estabeleceu ainda uma condição para o encerramento do ensaio de LWT: quando a deformação vertical atingia 2 cm o ensaio era interrompido. Uma vez que altura do corpo de prova testado por este autor era de 5 cm, esse valor de afundamento determinado para o encerramento do ensaio representa uma deformação de 40%, sendo este um valor bastante elevado.

Na presente pesquisa, o critério de parada do ensaio foi determinado por uma limitação no equipamento de LWT. A partir de determinado afundamento, o eixo da roda do equipamento encosta na borda da fôrma do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 4.62. A partir deste ponto, não é mais possível observar progressão no afundamento vertical. Além disso, insistir na continuação do ensaio pode resultar em danos no equipamento. Por este motivo, convencionou-se que o ensaio deveria ser interrompido tão logo o eixo da roda encostasse na fôrma do corpo de prova.

São apresentados e discutidos a seguir os resultados dos ensaios adaptados de LWT para as amostras puras e estabilizadas dos solos A, B e C.

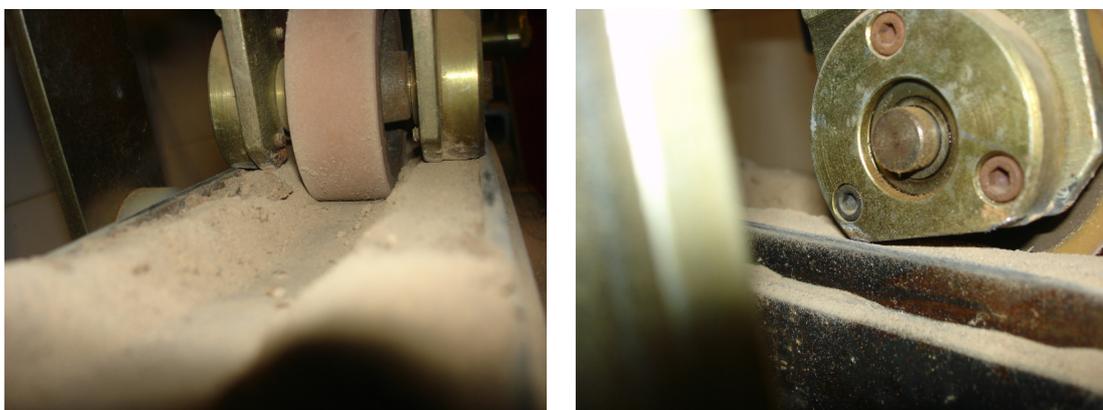


Figura 4.62 - Ilustração do eixo da roda do LWT encostando na borda da fôrma do corpo de prova.

4.5.1.1 Solo A

A Figura 4.63 apresenta os resultados de LWT para o solo A e suas misturas estabilizadas. Observou-se durante a realização dos ensaios que as amostras referentes a este solo, puro ou estabilizado, apresentaram-se pouco resistentes a passagem da roda, e bastante propícios à perda de material.

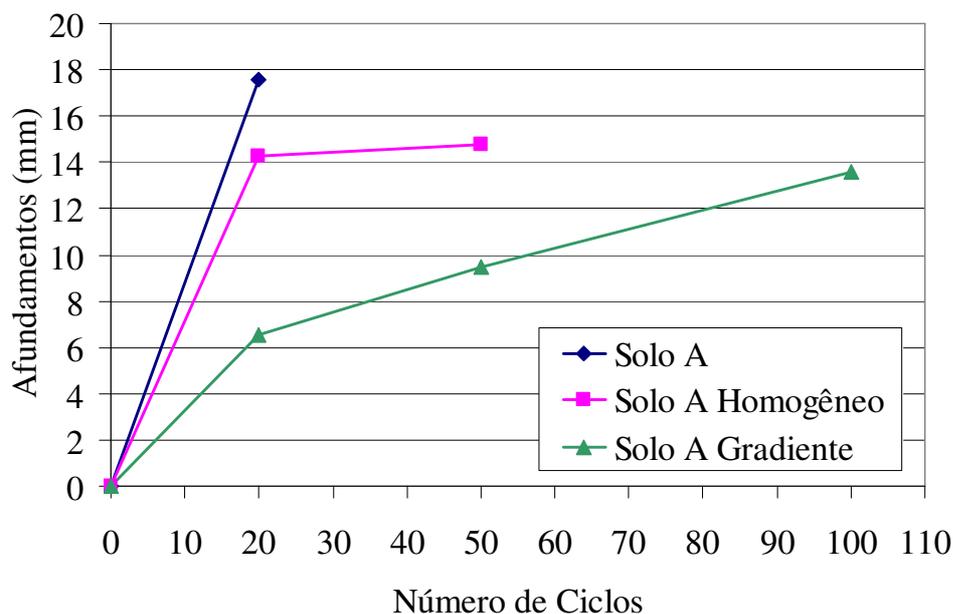


Figura 4.63 - Resultados dos ensaios de LWT para o solo A e suas misturas estabilizadas.

Analisando os resultados, verifica-se que a amostra de solo A puro atingiu a condição de parada do ensaio logo com os primeiros 20 ciclos, sofrendo uma deformação permanente de aproximadamente 18 mm. A amostra de solo A estabilizada com distribuição homogênea de emulsão, por sua vez, atingiu a condição de parada após a aplicação de 50 ciclos. A amostra de solo A estabilizada em gradiente suportou o maior número de ciclos, sendo que o ensaio chegou ao fim após 100 ciclos.

Estes resultados indicaram que a adição de emulsão asfáltica ao solo com a distribuição homogênea resultou em uma leve melhoria na resistência ao desgaste do solo A. No entanto, foi para distribuição em gradiente que foram observadas as melhorias mais significativas. Para os primeiros 20 ciclos do ensaio, observou-se um afundamento de 6,5 mm para a amostra em gradiente, enquanto o solo natural e a amostra estabilizada convencionalmente sofreram afundamentos de 17,6 mm, e 14,3 mm, respectivamente.

Ressalte-se que as amostras referentes ao solo A perderam muita massa durante a realização de ensaio, de modo que os afundamentos medidos não se devem exclusivamente às deformações permanentes das amostras.

É importante mencionar que resultados dos ensaios de LWT para as amostras referentes ao solo A devem ser avaliados somente de forma comparativa, a fim de se verificar a influência das diferentes formas de estabilização sobre o solo, uma vez que nenhum corpo de prova tolerou o ensaio completo. Desta forma, não foi possível verificar o afundamento máximo que estes solos sofreriam, inviabilizando a análise da compatibilidade da utilização dessas amostras em camadas sujeitas diretamente ao tráfego.

Observando ainda a Figura 4.63, verifica-se que, para a amostra A estabilizada com distribuição homogênea, as deformações permanentes tenderam a se estabilizar entres o 20º e 50º ciclo. Deve-se ressaltar que esta não é uma conclusão segura, uma vez que a condição de parada arbitrada para este ensaio é o esbarro do eixo da roda do LWT na fôrma do corpo de prova. Assim, é possível que o esbarro da roda tenha ocorrido antes do 50º ciclo, impedindo o real afundamento da trilha de roda e dando a falsa impressão de que as deformações foram estabilizadas.

Apresenta-se na Figura 4.64 o aspecto dos corpos de prova das amostras referentes ao solo A após a realização dos ensaios de LWT. É possível verificar que as amostras estabilizadas mostram-se mais resistentes à perda de material que o solo A puro.

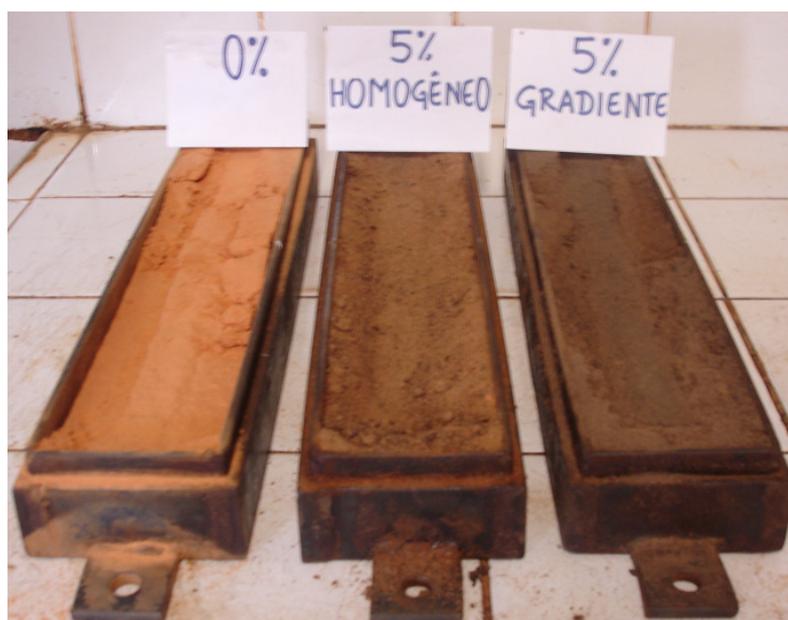


Figura 4.64 - Aspecto dos corpos de prova referentes ao solo A após a realização dos ensaios de LWT.

4.5.1.2 Solo B

Os resultados dos ensaios de LWT para o solo B e suas misturas estabilizadas com emulsão asfáltica são apresentados na Figura 4.65.

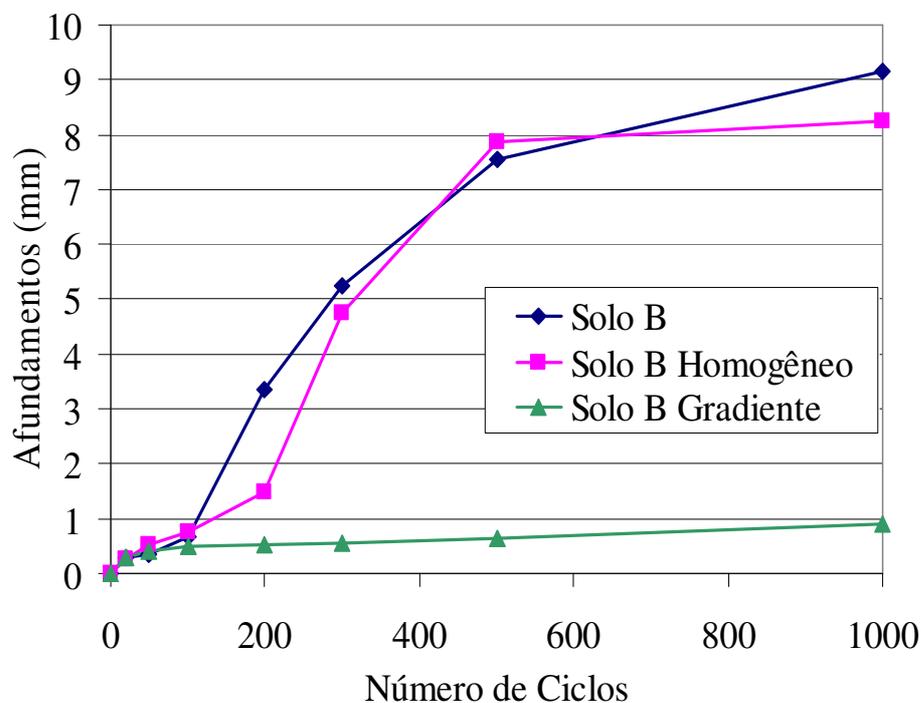


Figura 4.65 - Resultados dos ensaios de LWT para o solo B e suas misturas estabilizadas.

Verifica-se que as amostras referentes ao solo B suportaram o ensaio até o final, ou seja, até a aplicação de 1000 ciclos. Desta forma, sabe-se que as deformações indicadas pelos ensaios de LWT correspondem às deformações máximas reais dos corpos de prova.

Observou-se para este solo que a amostra estabilizada convencionalmente apresentou praticamente o mesmo comportamento que a amostra de solo B puro, com deformações permanentes de valores muito próximos, para cada número de ciclos. Isto indica que a estabilização convencional do solo B não resultou em melhoria na resistência ao desgaste pela ação do tráfego, à luz dos ensaios de LWT.

A estabilização em gradiente, por sua vez, conduziu a uma melhoria significativa nos resultados de LWT, se comparada ao solo puro e à estabilização convencional. Os corpos de prova do solo B com aplicação da emulsão em gradiente sofreram afundamentos de menos de 1 mm, representando menos de 10% da deformação obtida pelo solo natural. Este valor de afundamento para o solo estabilizado em gradiente é cerca de 2% da altura do corpo de prova.

Se a o afundamento da trilha de roda (ATR) observado em campo mantiver a mesma proporção que os resultados dos ensaios de LWT, conforme sugere Miceli Jr (2006), uma base de 15 cm de espessura de solo B estabilizado em gradiente apresentaria um ATR de aproximadamente 3 mm, sendo este um valor admissível para os critérios de avaliação de serventia de pavimentos. No entanto, é imprescindível mencionar que ainda não se sabe se os resultados de LWT adaptados se refletem proporcionalmente em campo, tornando necessária a confirmação por meio de correlações entre experiências realizadas em campo e em laboratório.

A Figura 4.66 apresenta o aspecto dos corpos de prova das amostras referentes ao solo B após a realização dos ensaios de LWT.



Figura 4.66 - Aspecto dos corpos de prova referentes ao solo B após a realização dos ensaios de LWT.

4.5.1.3 Solo C

Os resultados dos ensaios de LWT para o solo C e suas misturas estabilizadas com emulsão asfáltica são apresentados na Figura 4.67.

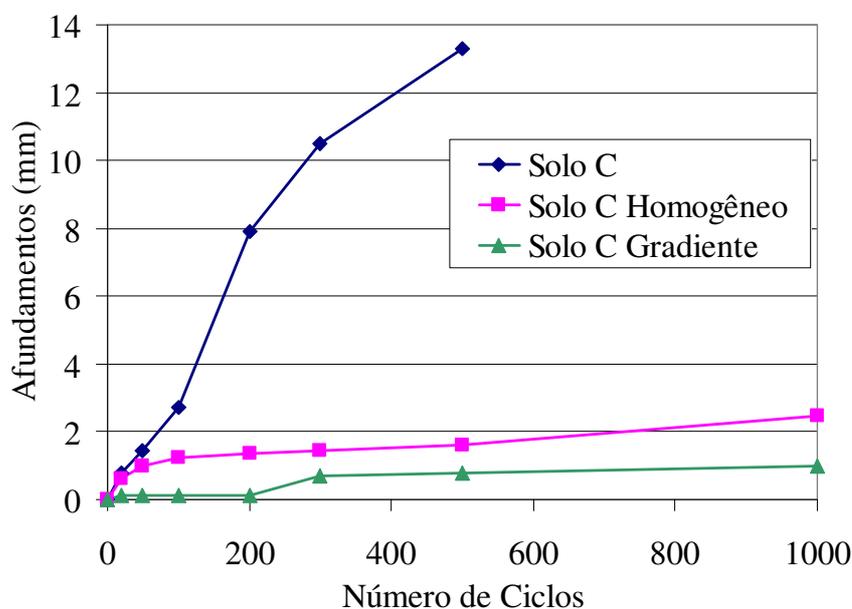


Figura 4.67 - Resultados dos ensaios de LWT para o solo C e suas misturas estabilizadas.

Enquanto a amostra de solo C puro atingiu a condição de parada do ensaio ao final do 500º ciclo, as amostras estabilizadas suportaram o ensaio completo, chegando ao 1000º ciclo. Logo, não se pode afirmar que a deformação máxima efetiva do solo C puro corresponde ao valor de 13,3 mm, medido no ensaio.

A aplicação de emulsão ao solo de forma homogênea gerou melhorias expressivas na resistência ao desgaste do solo C, mensurada pelo ensaio de LWT. A amostra estabilizada convencionalmente sofreu um afundamento máximo de 2,5 mm, contra uma deformação superior a 13,3 mm, observada para o solo natural, após 500 ciclos. Os valores de afundamento da amostra estabilizada homogeneamente representam uma deformação de 5% com relação à altura do corpo de prova. Além disso, a amostra do solo C estabilizada convencionalmente apresentou uma tendência de estabilização da deformação permanente a partir do 100º ciclo.

Resultados ainda mais significativos foram observados para as amostras de solo C estabilizadas em gradiente. O afundamento máximo sofrido por esta amostra foi de

1 mm, apresentando uma redução de cerca de 60% no afundamento sofrido pela amostra estabilizada convencionalmente. O afundamento máximo da amostra estabilizada em gradiente corresponde a uma deformação de aproximadamente 2%, com relação à altura do corpo de prova.

A Figura 4.68 apresenta o aspecto dos corpos prova referentes às amostras de solo C, naturais e estabilizadas, após a realização dos ensaios de LWT.



Figura 4.68 - Aspecto dos corpos de prova referentes ao solo C após a realização dos ensaios de LWT.

4.5.2 WTAT

Para o ensaio adaptado de WTAT, os critérios de avaliação propostos por Duque Neto (2004) consistem da avaliação visual, das medidas do afundamento e da perda de massa por abrasão. De maneira semelhante à avaliação do LWT, resolveu-se realizar a avaliação dos resultados de WTAT de forma quantitativa, excluindo-se a subjetividade da avaliação visual. A análise baseou-se nos valores de perda de massa por abrasão e nas medidas de afundamento dos corpos de prova.

Discute-se nos próximos itens os resultados dos ensaios adaptados de WTAT para as amostras puras e estabilizadas dos solos A, B e C.

4.5.2.1 Solo A

Os resultados da perda de massa por abrasão e do afundamento decorrentes da realização dos ensaios de WTAT para as amostras referentes ao solo A são apresentados na Figura 4.69.

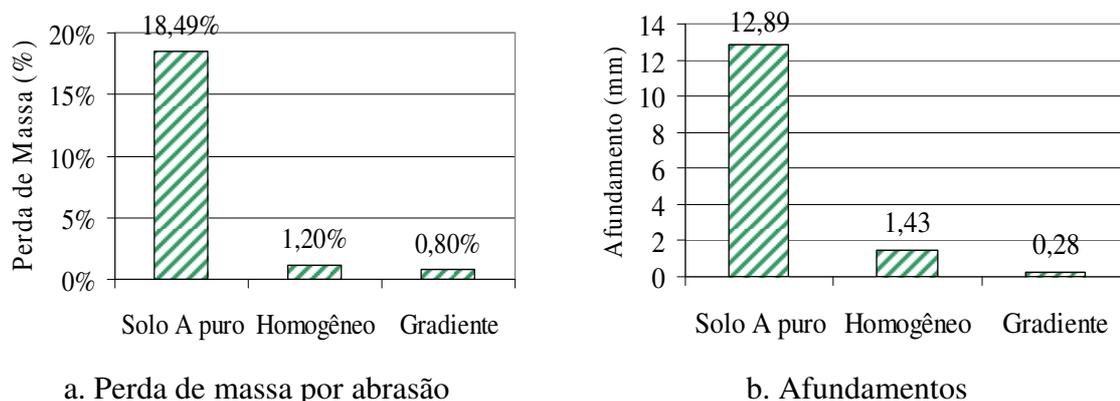


Figura 4.69 - Resultados dos ensaios de WTAT para o solo A e suas misturas estabilizadas.

Nota-se que o solo A puro apresentou resistência à abrasão muito baixa, o que resultou em uma elevada perda de massa por abrasão (18,5%) e em grande afundamento (12,9 mm). A aplicação de emulsão neste solo, com distribuição convencional ou em gradiente, gerou amostras bem mais resistentes ao esforço abrasivo. A perda de massa do solo A após a estabilização é de cerca de 1%, indicando a redução de aproximadamente 95% com relação à perda de massa do solo puro.

A melhoria na resistência à abrasão devido à estabilização refletiu-se também nos afundamentos sofridos pelos corpos de prova: a estabilização convencional deste solo resultou em uma diminuição de 90% no afundamento e a estabilização em gradiente reduziu em 98% o afundamento do solo A puro.

Comparando os dois processos de estabilização, verificou-se que as perdas de massa e os afundamentos observados para as amostras estabilizadas convencionalmente e em gradiente apresentaram valores da mesma ordem de grandeza, sendo que a estabilização em gradiente resultou em valores levemente menores.

Para uma melhor visualização do incremento de resistência à abrasão devido a aplicação de emulsão asfáltica, ilustra-se na Figura 4.70 o aspecto dos corpos de prova do solo A puro e do solo A estabilizado em gradiente.



Figura 4.70 - Aspecto das amostras de solo A puro e estabilizado em gradiente, após o ensaio de WTAT.

4.5.2.2 Solo B

Os resultados dos ensaios de WTAT para as amostras de solo B puro e estabilizado são apresentados na Figura 4.71.

Analisando os resultados dos ensaios verifica-se que a resistência à abrasão do solo B foi beneficiada com o processo de estabilização. A adição de emulsão ao solo, seja pelo processo convencional ou pela distribuição em gradiente, reduziu a perda de massa por abrasão a menos da metade, e reduziu o afundamento a cerca de 1/3 do valor experimentado pela amostra pura.

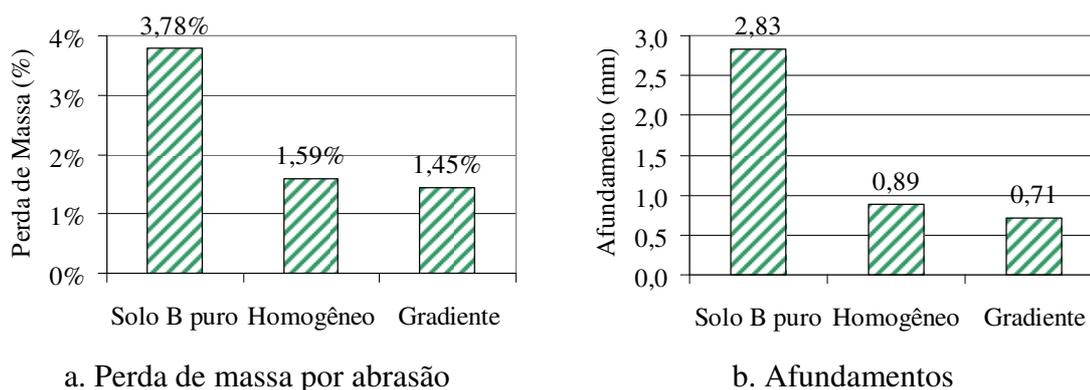


Figura 4.71 - Resultados dos ensaios de WTAT para o solo B e suas misturas estabilizadas.

A distribuição da emulsão em gradiente, para o caso do solo B, resultou em valores similares aos obtidos para a amostra estabilizada convencionalmente, embora se possa verificar que há um leve decréscimo em termos de magnitude de valores.

O aspecto dos corpos de prova do solo B puro (0%) e estabilizado (2%) após o ensaio é apresentado na Figura 4.72, onde é possível perceber a amostra de solo B estabilizada perde menos massa que o solo puro.



Figura 4.72 - Aspecto das amostras de solo B puro e estabilizado em gradiente, após o ensaio de WTAT.

4.5.2.3 Solo C

Os resultados dos ensaios de WTAT para as amostras do solo C puro e estabilizado são apresentados na Figura 4.73.

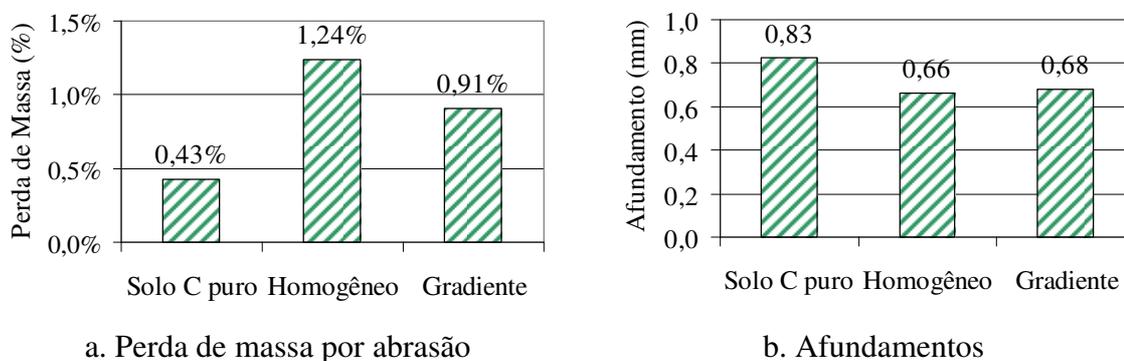


Figura 4.73 - Resultados dos ensaios de WTAT para o solo C e suas misturas estabilizadas.

Observa-se que o comportamento desta amostra de solo difere do observado para as amostras A e B. O solo C puro mostrou-se bastante resistente à abrasão, apresentando, inclusive, uma menor perda de massa que as amostras estabilizadas. Acredita-se que a natureza argilosa desta amostra tenha contribuído para uma maior resistência à abrasão. Com relação ao afundamento notou-se que a amostra de solo puro apresentou um afundamento levemente maior que as amostras adicionadas de emulsão.

O maior afundamento observado para o solo natural, em detrimento do fato desta amostra ter apresentado uma menor perda de massa que as amostras estabilizadas, pode ser justificado pela maior deformabilidade do solo C puro, verificada nos ensaios de módulo de resiliência e de LWT. As amostras estabilizadas deste solo são menos deformáveis que a amostra do solo puro, conforme foi observado nos ensaios de módulo de resiliência e de LWT.

Com relação à influência da forma de distribuição da emulsão sobre a perda de massa por abrasão, verifica-se que as amostras estabilizadas apresentaram uma resistência mais baixa que o solo em seu estado natural, sendo que a distribuição em gradiente resultou em uma perda de massa por abrasão ligeiramente menor que a estabilização convencional. Com relação ao afundamento do solo C, notou-se que a estabilização convencional e a estabilização em gradiente realizaram o mesmo efeito: redução de aproximadamente 17% no afundamento do solo puro. Percebe-se que a distribuição da emulsão em gradiente neste solo exerce pouca influência sobre a sua resistência à abrasão, à luz dos ensaios de WTAT, se comparadas aos efeitos da distribuição convencional.

Apresenta-se na Figura 4.74 o aspecto dos corpos de prova referentes ao solo C após a realização dos ensaios de WTAT. Pode-se perceber a maior perda de massa da amostra estabilizada que da amostra pura.



Figura 4.74 - Aspecto das amostras de solo C puro e estabilizado em gradiente, após o ensaio de WTAT.

Vale ressaltar ainda que, embora se tenha observado variações nos valores da perda de massa e do afundamento, os valores obtidos pelas amostras estabilizadas e puras foram da mesma ordem de grandeza e praticamente da mesma magnitude. As

variações de valores observadas, tanto para a perda de massa quanto para os afundamentos, podem ser frutos de pequenas variações na realização da moldagem dos corpos de prova ou do ensaio propriamente dito.

4.5.3 Efeitos da Estabilização Betuminosa sobre a Resistência ao Desgaste das Amostras Estudadas

Analisando conjuntamente os resultados dos ensaios de LWT para as amostras de solo A, B e C, pode-se perceber a grande influência da estabilização betuminosa sobre a resistência à passagem da roda nas três amostras de solo.

A estabilização betuminosa convencional mostrou-se bastante efetiva na redução do afundamento da amostra de solo C (coesiva), enquanto resultou em pouca ou nenhuma influência sobre o afundamento das amostras A e B (arenosas e ricas em sílica).

Esses resultados divergem do que foi observado por Miceli Jr (2006). Este autor verificou que a estabilização betuminosa resultou em uma melhoria nos valores de afundamento do solo identificado como A (arenoso) em sua pesquisa, enquanto sua amostra identificada como B (coesiva) mostrou-se demasiadamente plástica após a estabilização, sofrendo uma maior deformação devido à passagem da roda.

Com relação à estabilização em gradiente, foram observadas expressivas melhorias nos resultados de LWT. Após a aplicação da emulsão ao solo, em gradiente, verificou-se que a solo A atingiu a deformação máxima após um número de ciclos 5 vezes maior que a amostra de solo pura, enquanto os solos B e C sofreram afundamentos máximos inferiores a 10% do afundamento sofrido pelas suas respectivas amostras puras.

Com relação aos ensaios de WTAT, verificou-se que a estabilização betuminosa promoveu grandes benefícios aos solos A e B, gerando grande redução nas perdas de massa por abrasão e nos afundamentos destas amostras. Observou-se, ainda para as amostras A e B, que as duas formas de estabilização (convencional e em gradiente) resultaram em valores muito próximos nos parâmetros medidos nos ensaios de WTAT.

A amostra de solo C, por sua vez, mostrou-se bastante resistente à abrasão, de forma que a estabilização betuminosa exerceu pouca ou nenhuma influência sobre os parâmetros mensurados nos ensaios de WTAT.

É importante ressaltar que foram encontrados pequenos valores de perda de massa para os solos B e C, em comparação aos valores observados para o solo A, conforme ilustra a Figura 4.75. Acredita-se que a natureza mais argilosa das amostras B e C tenha evitado maiores perdas de material.

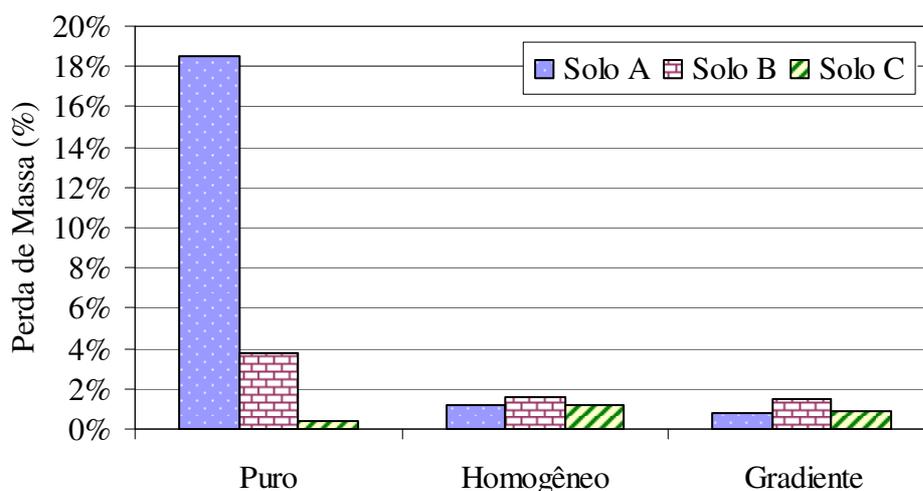


Figura 4.75 - Gráfico comparativo dos valores observados para a perda de massa das três amostras de solos estudadas.

Os resultados dos ensaios de WTAT indicaram ainda que a estabilização em gradiente não promove grandes benefícios para a resistência à abrasão dos solos, uma vez que a distribuição convencional da emulsão resulta em valores muito semelhantes de perda de massa por abrasão e de afundamento.

Conclui-se que os efeitos da estabilização betuminosa sobre os resultados de LWT diferem dos seus efeitos sobre os resultados de WTAT. Para o ensaio de LWT, onde a amostra é submetida à passagem de uma roda padrão, a estabilização em gradiente mostrou-se muito mais eficaz que a estabilização convencional. Para o ensaio de WTAT, onde a amostra é submetida aos esforços abrasivos de uma mangueira de borracha, a estabilização betuminosa convencional obteve resultados muito semelhantes aos alcançados pelas amostras estabilizadas em gradiente.

4.6 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS HIPOTÉTICOS

Com o intuito de avaliar numericamente o desempenho da técnica solo-emulsão, foi realizado o dimensionamento mecanístico de dois pavimentos, baseando-se nos resultados dos ensaios mecânicos realizados nesta pesquisa e em suas dispersões.

Buscou-se contemplar, nesta avaliação, o comportamento das misturas solo-emulsão quando utilizadas em camadas de base e em camadas de revestimento de uma rodovia de baixo volume de tráfego. O primeiro pavimento proposto (Estrutura 1) consiste de uma estrutura composta por duas camadas, onde o solo-emulsão é utilizado na camada de base assentada sobre o subleito, sendo revestida por um tratamento superficial simples. O outro pavimento (Estrutura 2) consiste de uma estrutura composta por uma camada apenas sobreposta sobre o subleito, onde o solo-emulsão acumula funções de base e revestimento. As duas estruturas são ilustradas na Figura 4.76.

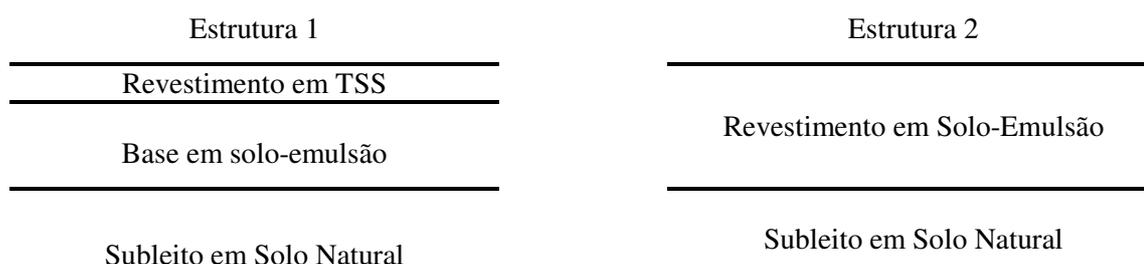


Figura 4.76 - Estruturas analisadas numericamente.

A amostra de solo-emulsão proposta para as estruturas acima consistiu da mistura do solo C com o seu teor ótimo de emulsão asfáltica (2%, conforme item 4.4.6). A escolha deste solo deve-se ao sucesso da estabilização betuminosa no melhoramento do seu comportamento mecânico e da sua resistência à abrasão e ao desgaste. O solo C foi a única amostra que se mostrou beneficiada pela aplicação da emulsão asfáltica em todos os parâmetros de resistência avaliados, mostrando-se inclusive pouco vulnerável à ação da água, conforme indicaram os resultados dos ensaios de ISC.

Os parâmetros mecânicos admitidos para a amostra de solo-emulsão foram os resultados dos ensaios mecânicos realizados após 28 dias de cura. Optou-se por basear-se nos parâmetros referentes à cura prolongada em prol da segurança, uma vez que ao final dos 28 dias a umidade residual do material seria bastante próxima à

umidade mínima, o que resultaria em sua resistência mínima, conforme sugerido pelas curvas de resistência \times umidade residual.

A análise mecanística das estruturas foi realizada por meio do programa FEPAVE2, versão de 2002. A partir da descrição do comportamento mecânico dos materiais e das condições de carregamento este programa realiza a análise de tensão e deformação do pavimento e fornece, como resultado, a deflexão no topo do pavimento, a deformação específica de tração, a diferença de tensão e a tensão de tração no revestimento, e a tensão vertical no subleito.

Utilizou-se o modelo elástico linear para descrever o comportamento do tratamento superficial e do solo do subleito, e um modelo elástico não-linear (modelo composto, mais especificamente) para descrever o comportamento da mistura solo-emulsão. Considerou-se para a condição de carregamento a ação do eixo simples padrão de 8,2 tf (pressão de 5,6 kgf/cm², aplicada numa área de raio igual a 10,8 cm), sendo desconsideradas as tensões gravitacionais.

Admitindo-se a possibilidade de oscilações nos valores do módulo de resiliência da mistura solo-emulsão, levou-se em consideração para esse material o desvio padrão no valor do coeficiente k_1 , encontrado por meio do programa LabFit. Apresentam-se na Tabela 4.28 os parâmetros mecânicos que descrevem os materiais empregados nesta análise mecanística.

Tabela 4.29 - Parâmetros que descrevem o comportamento dos materiais empregados na análise mecanística.

Material	MR (kgf/cm ²)	Desvio Padrão de k_1	Coefficiente de Poisson
Tratamento superficial Simples	5000	-	0,40
Solo-emulsão	$4655 \cdot \sigma_3^{0,185} \cdot \sigma_d^{0,182}$	138,79	0,45
Solo Natural	100	-	0,45

Ressalta-se que não foi encontrado na literatura estudos que apontassem um valor típico de módulo de resiliência para o tratamento superficial simples. Optou-se por admitir o valor de 5000 kgf/cm² para o módulo do TSS seguindo Marangon (2004) e Miceli Jr (2006). Ambos admitiram o valor de 500 MPa para o tratamento superficial. Para o material do subleito, admitiu-se um valor de módulo de resiliência de 1000 kgf/cm², seguindo recomendações do programa FEPAVE2.

Nos itens a seguir são apresentados e discutidos os resultados do dimensionamento das duas estruturas propostas.

4.6.1 Estrutura 1

A Estrutura 1 representa uma estrutura típica de uma rodovia de baixo volume de tráfego, sendo composta por um subleito, uma camada de base e um revestimento em tratamento superficial simples, conforme ilustrada na Figura 4.76. A avaliação dessa estrutura contempla diretamente o objetivo geral deste trabalho, que é verificar aplicabilidade da técnica solo-emulsão em camadas de base de pavimentos.

O primeiro passo para o dimensionamento da Estrutura 1 foi a fixação da espessura da camada de revestimento. Escolheu-se para esta camada a espessura de 2 cm, uma vez que esse valor é compatível com os valores das espessuras encontradas em campo para o tratamento superficial simples no estado do Ceará.

Em seguida, foram determinados os critérios de aceitação para a estrutura estudada. Os critérios de aceitação escolhidos para o dimensionamento dessa estrutura são a Deflexão máxima admissível na superfície (D_{adm}), dada pela equação (4.8) (DNER PRO 269/94), a tensão vertical admissível no subleito ($\sigma_{v adm}$), dada pela equação (4.9), e a tensão de tração na camada de base do pavimento.

$$\log D_{adm} = 3,148 - 0,188 \log N_p \quad (4.8)$$

$$\sigma_{v adm} = \frac{0,006MR_{médio}}{1 + 0,7 \log N_p} \quad (4.9)$$

Onde N_p é o número N para o período de projeto e $MR_{médio}$ é o valor médio do módulo de resiliência do subleito. Para esta pesquisa adotou-se número N de 10^6 e $MR_{médio}$ de 1000 kgf/cm^2 .

Adotando-se os valores definidos tem-se que:

$$D_{adm} = 104,7 \text{ centésimos de mm};$$

$$\sigma_{v adm} = 1,154 \text{ kgf/cm}^2.$$

A tensão de tração no fundo do revestimento foi desconsiderada desta análise porque não se conhece os dados relativos à vida de fadiga e nem de RTI do Tratamento superficial simples. Resolveu-se investigar a tensão crítica de tração na base, tomando-se como critério de aceitação uma σ_t adm no valor de 30% da RTI da amostra estudada.

Sabe-se que o recomendável seria basear-se na vida de fadiga da referida mistura, mas os ensaios de fadiga nas misturas solo-emulsão não se mostraram exequíveis: essas amostras chegaram a passar 72 horas em ensaio, com um nível de tensão de 30% e 40%, sem nunca chegar à ruptura. Ainda não se conhece a razão pela qual os corpos de prova não vieram à ruptura, mas acredita-se que o baixo nível de tensão solicitado estivesse fora da tolerância do equipamento.

Os resultados do dimensionamento da Estrutura 1 são apresentados na Tabela 4.29. Observou-se que a mistura solo C + 2% de emulsão mostrou-se pouco deformável e bastante eficaz na redução da tensão vertical no topo do subleito.

Tabela 4.30 - Resultados do dimensionamento da Estrutura 1, para um número N de 10^6 .

Espessura da base	Parâmetros	média	desvio padrão	Nível de Confiabilidade				Critério de Aceitação
				75	85	95	99,8	
24	D (0,01 mm)	51,00	1,00	51,67	52,03	52,64	54,00	104,71
	σ_v (kgf/cm ²)	0,99	0,01	1,00	1,00	1,01	1,02	1,15
	σ_t (kgf/cm ²)	0,20	0,03	0,22	0,23	0,25	0,29	0,47
22	D (0,01 mm)	52,00	1,00	52,67	53,03	53,64	55,00	104,71
	σ_v (kgf/cm ²)	1,14	0,02	1,15	1,16	1,17	1,20	1,15
	σ_t (kgf/cm ²)	0,19	0,03	0,21	0,22	0,24	0,28	0,47
20	D (0,01 mm)	53,00	0,00	53,00	53,00	53,00	53,00	104,71
	σ_v (kgf/cm ²)	1,26	0,01	1,27	1,27	1,28	1,29	1,15
	σ_t (kgf/cm ²)	0,15	0,03	0,17	0,18	0,20	0,24	0,47
15	D (0,01 mm)	55,00	2,00	56,34	57,06	58,28	61,00	104,71
	σ_v (kgf/cm ²)	1,77	0,01	1,78	1,78	1,79	1,80	1,15
	σ_t (kgf/cm ²)	0,03	0,01	0,04	0,04	0,05	0,06	0,47

Os resultados indicaram que a estrutura composta por uma camada de base de 22 cm de solo-emulsão é aprovada com um nível de confiabilidade de 75%, enquanto a estrutura composta por uma base de solo-emulsão de 24 cm é aprovada com um nível de confiabilidade de 99,8%.

4.6.2 Estrutura 2

A segunda estrutura proposta consiste de um pavimento onde a mistura solo-emulsão exerce papel de uma base não revestida, estando sujeita diretamente à ação abrasiva do tráfego. Esta estrutura foi proposta com a intenção de se verificar se a mistura solo-emulsão pode ser utilizada como revestimento, à luz da avaliação mecânica, uma vez que essas misturas mostraram-se resistentes à ação abrasiva dos ensaios de LWT e WTAT adaptados.

Os resultados do dimensionamento da estrutura 2 são apresentados na Tabela 4.31.

Tabela 4.31 - Resultados do dimensionamento da Estrutura 2.

Espessura Revestimento	Parâmetros	média	desvio padrão	Nível de Confiabilidade				Critério de Aceitação
				75	85	95	99,8	
25	D (0,01 mm)	50,00	0,00	50,00	50,00	50,00	50,00	104,71
	σ_v (kgf/cm ²)	1,05	0,01	1,06	1,06	1,07	1,08	1,15
	σ_t (kgf/cm ²)	0,19	0,02	0,20	0,21	0,22	0,25	0,47
24	D (0,01 mm)	50,00	0,00	50,00	50,00	50,00	50,00	104,71
	σ_v (kgf/cm ²)	1,12	0,02	1,13	1,14	1,15	1,18	1,15
	σ_t (kgf/cm ²)	0,16	0,03	0,18	0,19	0,21	0,25	0,47
22	D (0,01 mm)	51,00	0,00	51,00	51,00	51,00	51,00	104,71
	σ_v (kgf/cm ²)	1,27	0,01	1,28	1,28	1,29	1,30	1,15
	σ_t (kgf/cm ²)	0,12	0,01	0,13	0,13	0,14	0,15	0,47
20	D (0,01 mm)	52,00	0,00	52,00	52,00	52,00	52,00	104,71
	σ_v (kgf/cm ²)	1,46	0,02	1,47	1,48	1,49	1,52	1,15
	σ_t (kgf/cm ²)	0,05	0,04	0,08	0,10	0,12	0,17	0,47

Para a estrutura 2, os resultados indicaram que a espessura mínima da camada de base não revestida deveria ser de 24 cm, para um nível de confiabilidade de 95%. Para um nível de confiabilidade de 99,8%, a espessura a ser adotada é de 25 cm.

Comparando os resultados do dimensionamento da estrutura 1 e da estrutura 2, verifica-se que o tratamento superficial não exerce, de maneira significativa, função estrutural no pavimento estudado. Para uma mesma espessura da camada de base, as tensões de tração nas camadas de solo-emulsão e as tensões verticais no topo do

subleito das duas estruturas são da mesma ordem de grandeza, com ou sem emprego do tratamento superficial. Isso indica que, à luz do dimensionamento mecânico, a mistura solo-emulsão estudada pode ser empregada com sucesso em camadas de base não revestidas de pavimentos de baixo volume de tráfego.

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados apresentados e analisados neste capítulo são os resultados de um programa experimental, cujo principal objetivo era verificar se a técnica solo-emulsão pode ser utilizada com sucesso para construção de camadas de base de pavimentos no agropólo de Baixo Jaguaribe, no estado do Ceará.

Buscando atingir esse objetivo, foram verificados os efeitos da aplicação da emulsão asfáltica no comportamento mecânico e resistência às ações do tráfego de três solos oriundos da região em estudo.

Procurou-se verificar os efeitos da cura, do teor de emulsão e da forma de distribuição da emulsão sobre os parâmetros de resistência, buscando identificar também outros fatores que pudessem interferir no comportamento das misturas, como a composição química dos solos e a perda de umidade.

Os resultados mostraram que a resistência dos solos parece ser dependente da umidade residual dos mesmos no momento do ensaio, e não pelo tempo de cura, como se acreditava no início da pesquisa. Notou-se a tendência dos solos coesivos apresentarem resistência máxima a uma dada umidade residual ótima.

Observou-se que as misturas de alguns solos com emulsão asfáltica tendem a perder os efeitos da estabilização quando imersos em água, e que este efeito pode se relacionar com o teor de sílica presente nas amostras de solo.

Verificou-se que a adição de emulsão tem efeitos distintos para os diversos tipos de solo. A amostra de solo identificada como A experimentou, após a estabilização, aumento significativo na RCS e na RTI, bem como passou a alcançar valores mais elevados de módulo de resiliência para a maior parte dos pares de tensão. No entanto, a resistência das misturas do solo A com emulsão asfáltica pareceu muito susceptível à imersão em água, de forma que, após a saturação, o ISC da mistura estabilizada

mostrou-se inferior ao ISC do solo puro. Com relação aos ensaios de desgaste, a estabilização betuminosa não conseguiu reduzir de forma satisfatória a deformação permanente observada no ensaio de LWT, embora se tenha observado uma menor perda de massa no ensaio abrasivo de WTAT.

A amostra de solo B, ao ser adicionada a emulsão asfáltica, apresentou incrementos na RCS e na RTI, mas mostrou que o comportamento resiliente permaneceu praticamente inalterado. Além disso, observou-se que os efeitos da estabilização desta amostra são perdidos após saturação. Com relação à resistência ao desgaste, observou-se que estabilização convencional resulta em uma diminuição expressiva na perda de massa por abrasão, mas a deformação permanente observada no ensaio de LWT só foi reduzida satisfatoriamente com aplicação da emulsão em gradiente.

Os ensaios realizados com a amostra de solo C, por sua vez, mostrou efeitos satisfatórios da estabilização betuminosa em todos os ensaios realizados. Essa amostra tornou-se, após estabilização, mais resistente à compressão simples e à compressão diametral, e mostrou-se também menos deformável após estabilização, conforme pode ser observado nos ensaios de MR. O solo C estabilizado mostrou-se ainda resistente à ação da água, apresentando um ISC maior que o solo puro. A estabilização betuminosa convencional deste solo melhorou consideravelmente a sua resistência à deformação permanente observada no ensaio de LWT, enquanto a amostra de solo puro já se mostrava bastante resistente ao esforço abrasivo do WTAT.

Acredita-se que as conclusões deste trabalho, a serem apresentadas no próximo capítulo, venham a resultar em uma parcela de contribuição ao estudo das misturas solo-emulsão no estado do Ceará. Sabe-se que ainda há muito a investigar sobre a aplicabilidade da técnica solo-emulsão. Reconhece-se, sobretudo, que algumas das hipóteses levantadas no decorrer deste trabalho ainda precisam ser averiguadas com maior precisão, sendo apresentadas, no próximo capítulo, como sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões, recomendações e sugestões para pesquisas futuras, que resultaram da realização deste trabalho.

As conclusões aqui apresentadas baseiam-se na análise dos resultados do programa experimental executado e nos resultados de pesquisas semelhantes. Buscou-se contemplar, principalmente, o efeito do teor de emulsão aplicado, do tempo de cura e da forma da distribuição da emulsão na resistência mecânica e na resistência ao desgaste das misturas de emulsão asfáltica e solos oriundos do agropólo do Baixo Jaguaribe.

As conclusões apresentadas não se enquadram apenas no contexto do objetivo principal deste trabalho, que é verificar a aplicabilidade de misturas solo-emulsão em camadas de base de rodovias de baixo volume de tráfego. Buscou-se também encontrar, para as misturas estudadas, padrões de comportamento que pudessem, futuramente, vir a indicar os processos físicos e químicos que comandam as reações entre os solos e as emulsões asfálticas. A partir da identificação de indícios de alguns padrões de comportamento, foram observadas algumas questões que devem ser investigadas apropriadamente, sendo essas questões enumeradas como recomendações para futuras pesquisas.

Ressalta-se que a experiência de utilização da técnica solo-emulsão no estado do Ceará foi toda realizada em campo, baseando-se na experiência empírica dos técnicos envolvidos nos projetos. Estudos científicos envolvendo o potencial de utilização da técnica solo-emulsão em rodovias cearenses são inéditos. Espera-se que esta pesquisa venha a contribuir para a solidificação de conhecimentos sobre a técnica solo-emulsão, e que possa guiar projetos futuros, indicando alguns padrões de comportamento dessas misturas sobre a ação de determinados fatores, como tempo de cura e teor de emulsão aplicado.

5.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

5.2.1 Quanto à Caracterização Geotécnica, Química e Mineralógica dos Solos

- a) A amostra de solo identificada como A, classificada como uma areia quartzosa, apresentou uma granulometria descontínua, com predominância da fração areia, o que se refletiu no comportamento não plástico deste solo. Os resultados de granulometria e consistência indicaram que esta amostra poderia ser estabilizada com emulsão asfáltica, segundo os limites arbitrados por diversos autores.
- b) O amostra de solo B, classificada pedologicamente como um planossolo, embora também rica em areia, mostrou-se menos descontínua que a amostra A e apresentou um grande percentual de argila na sua composição. Devido à grande quantidade de material passando na peneira de número 200 (40%), essa material não seria indicado para estabilização betuminosa seguindo as recomendações da maioria dos pesquisadores.
- c) A amostra C, pertencente à classe pedológica dos cambissolos, foi a que apresentou graduação mais uniforme, e o maior limite de liquidez. Suas características limitariam a sua utilização em misturas solo-emulsão, segundo as recomendações da ABEDA (2001) e da ASTM (2006).
- d) Os resultados da densidade real dos solos A, B e C mostraram-se condizente com sua análise mineralógica. Os baixos valores das densidades reais indicaram presença de minerais mais leves como a caulinita e o feldzpató-K para as amostra A e B. A difratometria de Raios X para o solo A indicou a presença da caulinita e do feldzpató-K, enquanto a difratometria da amostra B mostrou uma maior incidência de caulinita. O alto valor da densidade real do solo C indicou a presença de ferro ou de argilo-minerais, enquanto a difratometria de Raios X identificou a predominância de goethita e caulinita nesta amostra.
- e) Os resultados de pH mostraram que os solos A e C são neutros, enquanto a amostra B é um solo ácido. Os resultados de ΔpH indicaram que as três amostras apresentam predominância de argilas silicatadas sobre os óxidos de ferro e alumínio, o que foi

confirmado pelos resultados da fluorescência de Raios X. Dentre as três amostras, o solo C é o que apresenta menor concentração de sílica.

- f) A atividade das argilas, inferida por meio da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) indicaram que as argilas dos solos A e C têm atividade alta, enquanto as argilas do solo B têm baixa atividade. Esses resultados estão de acordo com a classificação MCT, uma vez que a amostra B foi a única que apresentou comportamento laterítico.
- g) Os resultados da CTC indicaram que as três amostras são consideradas intemperizadas, enquanto as relações sílica-alumina (Ki) e sílica-sesquióxidos (Kr) apontaram a amostra C como o solo de maior evolução. A maior concentração de caulinita na amostra C que nos outros solos, verificado nos resultados da difratometria de Raios X, é um outro indicativo de que esta amostra é a mais intemperizada entre as três.

5.2.2 Quanto aos Resultados dos Ensaio de Compactação

- h) A adição de teores crescentes de emulsão provocou modificações na umidade ótima e na massa específica aparente seca máxima das amostras de solo. Essas modificações mostraram-se singulares para cada amostra, uma vez que não foi observado um mesmo padrão de variação de massa específica aparente seca máxima, nem de umidade ótima, com a variação nos teores de emulsão aplicados.
- i) Não foram encontradas correlações entre os padrões de variação dos parâmetros de Proctor e as características físicas, químicas e mineralógicas dos solos estudados, indicando não ser possível prever o comportamento da curva de compactação das misturas solo-emulsão a partir da curva de compactação do solo puro.
- j) As magnitudes das variações nos parâmetros de Proctor se mostraram consideráveis. A umidade ótima da amostra de solo identificada como A, por exemplo, é reduzida em aproximadamente 5 pontos percentuais (de 14,3% para 8,7%), após a aplicação de 8% de emulsão asfáltica. Essa amplitude de valores mostra a importância da prévia determinação da umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima

para a compactação de cada mistura solo-emulsão, uma vez que misturas compactadas incorretamente resultam em materiais mais frágeis ou deformáveis.

5.2.3 Quanto aos Resultados dos Ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS)

- a) Os corpos de prova de solo-emulsão ensaiados imediatamente após a moldagem não apresentaram aumento de resistência à compressão simples, se comparados às amostras de solo natural, indicando que a adição de emulsão asfáltica não influencia de forma imediata na resistência dos solos. Após cura seca ao ar, tendo se iniciado o processo de ruptura da emulsão asfáltica, foram observadas melhorias expressivas na RCS das misturas.
- b) Foram observados padrões distintos de comportamento da RCS com relação ao tempo de cura para os solos coesivos e granulares. O solo granular apresentou uma RCS sempre crescente com o aumento do tempo de cura. Para as amostras coesivas observou-se que a resistência à compressão simples aumentou após cura seca de 7 dias, mas essa resistência sofreu redução com o prolongamento do tempo de cura para 28 dias.
- c) A umidade residual dos corpos de prova parece exercer maior influência sobre a resistência a compressão simples que o tempo de cura. Foram observadas duas tendências de variação da RCS com relação à umidade residual dos corpos de prova no momento do ensaio. A RCS dos solos granulares mostrou uma tendência em crescer exponencialmente com a redução da umidade residual, enquanto a RCS dos solos coesivos parece relacionar-se com a umidade residual seguindo uma tendência parabólica. Desta forma, observou-se para as amostras coesivas a existência de uma umidade residual ótima que conduza a uma máxima RCS.
- d) Ressalta-se que, embora as misturas dos solos coesivos com emulsão asfáltica sofram uma diminuição da resistência máxima a partir da redução da umidade residual ótima, a resistência observada para a condição mais seca ainda representa valores consideráveis, se comparada à resistência dos solos puros.

- e) Com relação à influência do teor de emulsão sobre a RCS das misturas, verificou-se a existência de um teor ótimo de emulsão que conduziu à máxima RCS em cada solo, e que a aplicação de teores maiores de emulsão conduz à redução da resistência. Verificou-se que a amostra de solo mais granular necessitou de uma quantidade maior de emulsão asfáltica para uma estabilização satisfatória que os solos coesivos.
- f) Aplicação da emulsão asfáltica em gradiente reduziu a resistência à compressão simples das amostras estabilizadas dos solos. A RCS das amostras em gradiente mostrou-se limitada pela resistência do topo do corpo de prova, onde há uma concentração de emulsão asfáltica maior que o teor ótimo de emulsão.

5.2.4 Quanto aos Resultados dos Ensaios de Resistência à Tração Indireta (RTI)

- a) As amostras de solo-emulsão ensaiadas imediatamente após a moldagem apresentaram uma RTI menor que a capacidade de leitura da prensa, ou seja, praticamente não suportaram esforços de tração.
- b) Após a cura seca ao ar pelo período de 7 dias a RTI das misturas experimentou crescimento considerável, mas sofreram redução com o prolongamento do tempo de cura para 28 dias (inclusive para as misturas com o solo granular).
- c) Existe um teor ótimo de emulsão asfáltica para a obtenção da máxima RTI de cada amostra de solo. Nos solos mais coesivos, o teor ótimo de emulsão indicado para a máxima RTI coincidem com os teores indicado para a máxima RCS. Para a amostra de solo pouco coesiva observou-se que o teor de emulsão asfáltica que conduz à máxima RTI geram uma mistura com RCS muito aquém do potencial máximo deste solo.

5.2.5 Quanto aos Resultados dos Ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC)

- a) As amostras estudadas de solo-emulsão se comportaram de maneiras distintas na presença de água, indicando que a aderência entre a emulsão asfáltica e as partículas de solo difere para cada amostra estudada.
- b) As amostras estabilizadas de solo A e B mostraram-se prejudicadas pela saturação, apresentando ISC iguais ou inferiores aos índices alcançados pelas amostras de solos puros. As amostras de solo C experimentaram grande aumento no ISC se comparadas à amostra de solo puro. Desta forma, acredita-se que as misturas dos solos A e B com emulsão asfáltica não devam ser utilizadas em camadas de pavimentos propícias à saturação.
- c) Há indícios de que uma maior concentração de sílica nas amostras influencie na aderência entre a emulsão asfáltica e as partículas, tornando-as mais susceptíveis à ação da água. A amostra que apresentou a maior concentração de sílica foi a amostra mais prejudicada pela imersão em água, enquanto a amostra que apresentou a menor concentração de sílica mostrou-se pouco susceptível à saturação. Sendo confirmada esta hipótese, o teor de sílica nas amostras de solo poderá ser um critério limitador para a escolha de materiais a serem estabilizados com emulsão asfáltica.

5.2.6 Quanto aos Resultados dos Ensaios de Módulo de Resiliência (MR)

- a) Assim como os resultados da RCS e da RTI, os resultados dos ensaios de módulo de resiliência mostraram que a adição de emulsão ao solo não provoca melhorias nos solos de forma imediata. Somente após o início do processo de ruptura da emulsão é que são observados melhoramentos no comportamento resiliente das amostras estudadas.
- b) A aplicação da emulsão asfáltica provocou diferentes efeitos nos solos estudados: para a amostra mais arenosa (solo A), os valores do MR aumentaram para a maioria dos pares de tensão, mas o módulo tornou-se mais dependente da tensão de confinamento que o solo puro. Para a amostra do solo B, a adição de emulsão asfáltica foi indiferente ao seu comportamento resiliente para todas as condições de cura. A amostra de solo C, a mais plástica entre as amostras estudadas,

experimentou expressiva melhoria após a estabilização betuminosa. A deformabilidade do solo C após a estabilização foi significativamente reduzida, sendo o comportamento resiliente menos susceptível às variações das tensões de confinamento e desviatória.

- c) O teor ótimo de emulsão observado para o melhor comportamento resiliente das amostras de solo A e C foi o mesmo teor ótimo indicado para a máxima RCS. Para o solo B não foi observado um teor ótimo para um melhor comportamento resiliente, uma vez que o módulo de resiliência desta amostra mostrou-se indiferente à adição de emulsão asfáltica.
- d) A distribuição da emulsão asfáltica em gradiente tornou as amostras de solo B e C tão ou mais deformáveis que as amostras de solo puro, enquanto a aplicação em gradiente da emulsão no solo A resultou um material de comportamento resiliente semelhante à amostra estabilizada convencionalmente.

5.2.7 Quanto aos Resultados dos Ensaios de LWT Adaptados

- a) A estabilização betuminosa convencional mostrou-se bastante efetiva na redução do afundamento da amostra de solo C (coesiva), enquanto resultou em pouca ou nenhuma influência sobre o afundamento das amostras A e B (ricas em sílica).
- b) A aplicação da emulsão em gradiente promoveu significativas melhorias nos resultados dos afundamentos dos três solos em estudo, indicando que a maior concentração de emulsão no topo da camada gera superfícies de pavimentos mais resistentes às ações do tráfego.

5.2.8 Quanto aos Resultados dos Ensaios de WTAT Adaptados

- a) A estabilização betuminosa convencional das amostras A e B reduziu a perda de massa e os afundamentos decorrentes da ação abrasiva dos ensaios de WTAT, se comparadas aos resultados dos ensaios realizados com os solos puros. Para o solo C, no entanto, a amostra de solo puro mostrou-se bastante resistente ao esforço abrasivo do ensaio, de forma que a estabilização betuminosa exerceu pouca, ou nenhuma influência sobre a perda de massa e o afundamento dessa amostra.

- b) A distribuição da emulsão em gradiente nos solos estudados mostrou pequeno melhoramento da resistência à abrasão, uma vez que as amostras estabilizadas em gradiente apresentaram valores de perda de massa e de afundamento muito próximos aos valores apresentados pelas amostras estabilizadas convencionalmente.

5.2.9 Quanto à Distribuição da Emulsão em Gradiente

- a) A distribuição da emulsão em gradiente não resultou em misturas de comportamento mecânico superior às misturas estabilizadas convencionalmente. Para o caso dos solos B e C, a estabilização em gradiente resultou em materiais mais deformáveis que os solos puros.
- b) Os resultados dos ensaios de WTAT mostraram que a estabilização betuminosa convencional obteve resultados muito semelhantes aos alcançados pelas amostras estabilizadas em gradiente.
- c) A estabilização em gradiente mostrou-se muito mais eficiente que a estabilização convencional apenas para a resistência à passagem da roda promovida pelo ensaio adaptado de LWT.
- d) Conclui-se que a distribuição da emulsão asfáltica em gradiente não é recomendada quando se pretende melhorar o comportamento mecânico e a resistência à abrasão de uma amostra de solo. A distribuição em gradiente só é justificada quando se pretende controlar a deformação permanente, responsável pelo afundamento da trilha de roda.

5.2.10 Quanto ao Dimensionamento de um Pavimento com o Emprego de Solo-Emulsão

- a) A luz do dimensionamento mecanístico realizado, verifica-se que o solo C estabilizado pode ser utilizado tanto em camadas de pavimentos revestidos, como em camadas de base não revestidas, ficando essa camada sujeita diretamente à ação do tráfego.

5.3 RECOMENDAÇÕES

- a) O primeiro passo para a avaliação do comportamento mecânico das misturas solo-emulsão deve ser a determinação das curvas de compactação para cada teor de emulsão a ser analisado. A compactação da mistura de solo-emulsão deve ser realizada segundo a sua umidade ótima e a sua massa específica aparente seca máxima, com o intuito de evitar compactações defeituosas que gerem materiais mais deformáveis ou de qualidade inferior.
- b) Sugere-se que o método de dosagem para as misturas solo-emulsão seja baseado, inicialmente, nos ensaios de resistência à compressão simples, devido à simplicidade de realização desse ensaio.
- c) As rodovias de solo-emulsão não devem ser liberadas imediatamente ao tráfego, uma vez que o processo de cura mostrou-se imprescindível para o desempenho satisfatório dessas misturas.
- d) Sugere-se que o solo C estabilizado possa ser utilizado em camadas de base de rodovias de baixo volume de tráfego, uma vez que essa amostra mostrou boa resistência mecânica, pouca susceptibilidade à ação da água, boa resistência ao desgaste, além de obedecer aos requisitos admissíveis no método de dimensionamento mecanístico.
- e) Recomenda-se a utilização das misturas estabilizadas de solo A em camadas de pavimentos somente em situações onde a camada não seja sujeita à saturação. Sugere-se o envelopamento da camada, visando protegê-la das ações nocivas da água.
- f) Não se justifica a estabilização betuminosa do solo B para aplicação em pavimentação, uma vez que as misturas dessa amostra com emulsão asfáltica apresentaram comportamento resiliente semelhante ao solo natural, além de mostraram-se susceptíveis à saturação.
- g) Recomenda-se, à luz do experimento aqui desenvolvido, que alguns solos do agropólo do Baixo Jaguaribe possam ser estabilizados com emulsão asfáltica, visando sua aplicação em camadas mais nobres de um pavimento.

5.4 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Conforme já ressaltado, percebeu-se a necessidade de serem desenvolvidas outras pesquisas que dêem continuidade ao trabalho aqui exposto. Para isso, sugere-se que sejam desenvolvidos os seguintes assuntos:

- a) avaliar a estabilização betuminosa de um número maior de solos ocorrentes na região em estudo, com o objetivo de elaborar um banco de dados sobre as potencialidades dos diferentes tipos de solos estudados. Esse banco de dados poderia ser posteriormente ampliado para outros tipos de estabilização, contribuindo para a formação de catálogos de soluções de pavimentação de baixo custo.
- b) investigação sobre as correlações entre a resistência e a umidade residual dos corpos de prova de solo-emulsão no momento da realização do ensaio. Poderiam ser moldados vários corpos de prova de resistência à compressão simples que seriam submetidos à cura acelerada em estufa e seriam rompidos segundo pequenos intervalos de variação de umidade residual. Desta forma, seria possível a identificação de padrões confiáveis de comportamento.
- c) avaliação dos efeitos da sucção sobre a resistência das amostras de solo estabilizadas com emulsão asfáltica.
- d) investigação sobre a influência do teor de sílica na adesão entre a emulsão e as partículas de solo e na susceptibilidade de misturas solo-emulsão à ação da água.
- e) avaliação do comportamento mecânico das misturas solo-emulsão sob condição de saturação, submetendo corpos de prova saturados aos ensaios de resistência à compressão simples e o módulo de resiliência.
- f) análise da infiltrabilidade e da impermeabilidade dos solos após estabilização betuminosa.
- g) realização de estudos de imprimação de bases solo-emulsão e da avaliação do desgaste superficial, comparando com os resultados do desgaste superficial sofrido pelas amostras de solo-emulsão sujeitas diretamente à ação do tráfego.

- h) Realização de análise do comportamento das misturas solo-emulsão quando submetidas à simulação de tráfego.
- i) Realização de um trecho experimental de uma base não revestida de solo-emulsão, com freqüentes medições de desempenho, de forma que seja possível correlacionar o comportamento em campo com os resultados dos ensaios adaptados de LWT e WTAT e com o desempenho observado por meio do simulador de tráfego.
- j) Realização de estudos que contemplem a viabilidade econômica do emprego da técnica solo-emulsão em camadas de base de pavimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEDA (2001) *Manual Básico de Emulsões Asfálticas - Soluções para Pavimentar sua Cidade*. Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1971) NBR 6297 - *Determinação de Ruptura de Emulsões Asfálticas - Método da Mistura com Cimento*. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnica, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1992) NBR 12253 - *Solo-Cimento - Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento*. Associação Brasileira de Normas Técnica, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1997) NBR 14393 - *Emulsões Asfálticas - Determinação da Peneiração*. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnica, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1999) NBR 6299 - *Emulsões Asfálticas - Determinação do pH*. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnica, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1999) NBR 6568 - *Emulsões Asfálticas - Determinação do Resíduo de Destilação*. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnica, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2000) NBR 6302 - *Emulsões Asfálticas - Determinação da Ruptura – Método de Mistura com Fíler Silícico*. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnica, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2000) NBR 6567 - *Determinação da Carga da Partícula de Emulsões Asfálticas*. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnica, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2000) NBR 6569 - *Emulsões Asfálticas Catiônicas - Determinação da Desemulsibilidade*. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnica, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2000) NBR 6570 - *Emulsões Asfálticas - Determinação da Sedimentação*. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnica, Rio de Janeiro, RJ.

- ABNT (2001) NBR 14481 - *Determinação do excesso de asfalto e adesão de areia*. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnica, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2001) NBR 14746 - *Determinação de perda por abrasão úmida*. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnica, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2001) NBR 6293 - *Materiais Betuminosos - Determinação da Ductilidade*. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnica, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2001) NBR 6300 - *Emulsões Asfálticas Catiônicas - Determinação da Resistência à Água*. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnica, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2002) NBR 14855 - *Materiais Betuminosos - Determinação da Solubilidade em Tricloroetileno*. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnica, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2005) NBR 9619 - *Produtos de Petróleo - Destilação à Pressão Atmosférica*. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnica, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2007) NBR 14491 - *Emulsões Asfálticas - Determinação da Viscosidade Saybolt Furol*. Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2007) NBR 6576 - *Materiais Asfálticos - Determinação da Penetração*. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnica, Rio de Janeiro, RJ.
- ARAUJO, R.N. A; LUCENA, F.B; FERREIRA, H.C. (1983) Propriedades de resistência ao cisalhamento de solos lateríticos estabilizados com emulsão asfáltica catiônica RM-1C. *Anais da 18ª Reunião Anual de Pavimentação*. Porto Alegre, RS.
- ASTM (2006) D 4223-99 - *Standard Practice for Preparation of Test Specimens of Asphalt Stabilized Soils*. American Society of Testing Materials, United States *apud* MICELI JR, G. (2006) *Comportamento de Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.

- BAPTISTA, G. M. M.; NETTO, J. S. M.; MENESES, M. R. (1998) Determinação da Relação Sílica - Alumina a partir dos Dados do Sensor AVIRIS (JPL/NASA), para Discretização Espacial do Grau de Intemperismo de Solos Tropicais. *Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Santos, SP. p. 1345-1355.
- BARROSO. S. H. A. (2002) *Estudos de solos da Região Metropolitana de Fortaleza para Aplicação na Engenharia Rodoviária*. Tese de Doutorado. 178 p. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, São Paulo.
- BASTOS, C. (2002) *Estabilização de Solos*. Notas de Aula, Disciplina Mecânica dos Solos, Curso de Engenharia Civil, Fundação Universidade Federal do Rio Grande.
- BERNUCCI, L. L.B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2007) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. PETROBRÁS: ABEDA. Rio de Janeiro.
- BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; WHITE, J. L.; ENSMINGER, L. E.; CLARK, F. E. (1965) *Methods of soil analysis. Part 2 - Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin.
- BUENO, B. S. (1991) Estudo Experimental em Laboratório de Solos Estabilizados com Betume. *Anais da 25ª Reunião Anual de Pavimentação*, São Paulo, SP.
- BUOL, S. W.; HOLE, F. D.; MCCracken, F. D.; SOUTHARD, R. J. (1997) *Soil genesis and classification*. 2.th.ed. Ames: Iowa State University, 527p.
- CARVALHO, C.A.B.; DOURADO FILHO, J. E ESPÍRITO SANTO, N.R. (1992) Uma Análise de Desgaste e de Resistência à Compressão Simples – Mistura de Solo-Betume. *Anais da 26ª Reunião Anual de Pavimentação*, Aracaju, SE.
- CARVALHO, J. M. M.; CABRAL, R. C. (2003) *Pólo de Desenvolvimento Integrado Baixo Jaguaribe: Informações Estratégicas*. Banco do Nordeste. Fortaleza, CE.
- CASTRO C. A. A. (2003) *Estudo da Técnica de Anti-Pó com Emulsão de Xisto em Pavimentos para Baixo Volume de Tráfego*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia Civil. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.

- COSTA, J. B. (1973). *Caracterização e Constituição do Solo*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal, 527p.
- COUTO, E. G. (2008) *Notas de Aula da Disciplina de Solos III*. Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Universidade Federal de Mato Grosso.
- DAS, B. M. (2007) *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. Tradução da 6ª Edição Norte-Americana. Tradução All Tasks. Ed. Thomson Learning. São Paulo.
- DER-SP (1991) Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. *Manual de Normas: Pavimentação*. DER-SP. São Paulo.
- DNER (1994) ME 004/98 - *Material Betuminoso - Determinação da Viscosidade Saybolt-Furol a Alta Temperatura*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (1994) ME 041/94 - *Solos - Preparação de Amostras para Caracterização*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (1994) ME 049/94 - *Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras não Trabalhadas*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (1994) ME 051/94 - *Solos - Análise Granulométrica*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (1994) ME 082/94 - *Solos - Determinação do Limite de Plasticidade*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (1994) ME 093/94 - *Solos - Determinação da Densidade Real*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (1994) ME 122/94 - *Solos - Determinação do Limite de Liquidez – Método de Referência e Método Expedido*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (1994) ME 129/94 - *Solos - Compactação Utilizando Amostras Não Trabalhadas*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.

- DNER (1994) ME 131/94 - *Solos - Módulo de Resiliência de Amostras Compactadas*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (1994) ME 138/94 - *Misturas Asfálticas - Determinação da Resistência à Tração na Compressão Diametral*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (1994) ME 202/94 - *Solo-Cimento - Resistência à Compressão Simples de Corpos-de-Prova Compactados*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (1994) ME 256/94 - *Solos Compactados em Equipamento Miniatura - Determinação da Perda de Massa por Imersão*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (1994) ME 258/94 - *Solos Compactados em Equipamento Miniatura - Mini-MCV*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (1994) PRO 269/94 - *Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis - TECNAPAV*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (1998) ME 002/98 - *Emulsão Asfáltica - Carga da Partícula*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (2000) ME 006/00 - *Emulsões Asfálticas - Determinação da Sedimentação*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DUNN, C. S.; SALEN, M. N. (1973) *Temperature and Time Effects on the Shear Strength of Sand Stabilized with Cationic Bitumen Emulsion*. Highway Research Record nº 442 *apud* FERREIRA, A.M. (1980). *Estudo de Três Solos Estabilizados com Uma Emulsão Asfáltica Catiônica*. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 99p.
- DUQUE NETO, F.S. (2004) *Proposição de metodologia para a escolha de solo e dosagem de antipo com emulsão de xisto*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

- EMBRAPA (1997) *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 212p.
- ENDERSBY, V. A.; KRYNINE, D. P.; HOLMES, A. (1942) Fundamental Reseach in Betuminous Soil Stabilization. *Highway Research Board Proceedings* vol 22, p. 442-459.
- FERREIRA, A.M. (1980). *Estudo de Três Solos Estabilizados com Uma Emulsão Asfáltica Catiônica*. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 99p.
- GUARÇONI, D. S.; GOMES DE MATTOS, A. B.; GONÇALVES, N. R. (1988) Estabilização de Solos com Betume Técnicas de Execução. *Anais da 23ª Reunião Anual de Pavimentação*. Florianópolis, SC.
- HIGHWAY RESEARCH BOARD (1946) *Soil Bituminous Roads – Current Road Problems N° 12*. Washington D.C. *apud* ROAD RESEARCH LABORATORY (1951) *Mecânica dos Solos para Engenheiros Rodoviários*. V II, Edgar Blücher Editor, São Paulo, SP.
- HUNTER, R. N. (2000) *Asphalts in Road Construction*. Thomas Thelford Ed. London.
- INGLES, O.G. & METCALF, J.B. (1972) *Soil Stabilization Principles and Practice*. Butterworths, Sydney, Australia, 374p.
- IPECE (2005) *Perfil Básico Municipal*. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Governo do Estado do Ceará, Fortaleza, CE.
- JACINTHO, E. C. (2005) *Estudo do Comportamento de Misturas Solo-Emulsão para Uso em Barragens*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UnB, Brasília, DF.
- JACINTHO, E.C; CARVALHO, J.C; FARIAS, M.M, & GUIMARAES, R.C. (2005) Influência das Propriedades Físicas, Químicas e Mineralógicas do Solo no Comportamento de Misturas Solo-Emulsão. *Anais da 36ª Reunião Anual de Pavimentação*. Curitiba, PR.

- KÉZDI, A. (1979) *Stabilized Earth Roads – Developments in Geotechnical Engineering*. Elsevier Company. Apud MICELI JR, G. (2006) *Comportamento de Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.
- KIEHL, E.J. (1979). *Manual de Edafologia: Relações Solo - Planta*. Editora Agronômica CERES Ltda, São Paulo, SP, 262p.
- LAMBE, T. W. E WHITMAN, R. V. (1979). *Soil Mechanics*. Massachusetts Institute of Technology, John Wiley & Sons, 553p.
- LOIOLA, P. R. R; BARROSO, S. H. A. (2007) Aplicação da Técnica de Solo Cal na Construção da Rodovia do Melão no Estado do Ceará. *Anais da 37ª Reunião Anual de Pavimentação*. Goiânia, GO.
- LUCENA, F. B.; FERREIRA, H. C.; ARAÚJO, R. N. A. (1982) Uso de Emulsão Catiônica na Estabilização de Solos Lateríticos. *Anais da 17ª Reunião Anual de Pavimentação*. Brasília, DF.
- MARANGON, M (2004) *Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para a Região de Minas Gerais Utilizando Solos Lateríticos Locais a Partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- MATTOS, A. B. G. (1991) Estabilização de Solo com Betume. *Anais da 25ª Reunião Anual de Pavimentação*. São Paulo, SP.
- MEDINA, J., MOTTA, L. M. G.(2005) *Mecânica dos Pavimentos- 2ª edição*. Editora COPPE, Rio de Janeiro, 2005.
- MICELI JR, G. (2006) *Comportamento de Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.

- MICELI JR, G.; MOTTA, L. M. G.; OLIVEIRA, J. R. M. S. E VIERA, A. (2006) Comportamento de Dois Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica. *Anais da 37ª Reunião Anual de Pavimentação*, Goiânia, GO.
- MOMM, L. (1983) Uso de Emulsão Catiônica na Estabilização de Solos. *Anais da 18ª Reunião Anual de Pavimentação*. Porto Alegre, RS.
- MOREIRA, E. D. (2002). *Estabilização Betuminosa de uma Base ou Revestimento Primário como Alternativa para Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego*. Revista Vias Gerais, n.03. DER/MG. Disponível no site <http://www.assender.com.br/estabilizacao_betuminosa.pdf>. Acesso em 31 jan. 2006.
- MUIR, L.; HUGHES, W.; BROWNING, G. (1938) Bitumionous Stabilization Practices in the United States. *Highway Research Board Proceedings* vol. 18, part II, p. 306-313.
- NASCIMENTO, H. R. C. (2005) Tecnologia dos Ligantes Betuminosos – Emulsões. *Simpósio Brasileiro de Pavimentação*. Brasília, D.F.
- OMENA, W. E ANTOSCZEZEM JUNIOR, J. A. (2006) Emulsão Asfáltica Uma Boa e Velha Companheira. *Fatos e Asfaltos – Informativo Trimestral Greca Asfaltos*. Ano 2, n. 6, p. 8.
- PINTO, C. S. (2006) *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. 3ª Edição. Ed. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 355p.
- RABÊLO, A. N. (2006) *Contribuição ao Estudo da Imprimação Betuminosa das Bases Rodoviárias do Estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia do Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- ROAD RESEARCH LABORATORY (1951) *Mecânica dos Solos para Engenheiros Rodoviários*. V II, Edgar Blücher Editor, São Paulo, SP.
- ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E.R.; LEE, D. Y.; KENNEDY, T. W. (1996) *Hot Mix Asphalt Materials, Mixtures Design, and Construction*. Second edition. NAPA Education Foundation. Lanham, Maryland.

- SANT'ANA, W. C., BERNUCCI, L. L. B., LEITE, L. M. (2007) Pavimento em Solo-emulsão para Vias de Baixo Volume de Tráfego. *Anais da 38ª Reunião Anual de Pavimentação*. Manaus, AM.
- SANTANA, H. (1976) Estabilização Betuminosa de Revestimentos Primários. *Anais da 1ª Reunião de Técnicos em Manutenção de Estradas de Rodagem – 1ª REMETER*. Fortaleza, CE.
- SANTIAGO, L. S. (2005) *Interfaces entre Desenvolvimento, Políticas de Agronegócio e Políticas de Transportes: o Caso da Região da Ibiapaba no Estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- SANTOS, P. S. (1975) *Tecnologia de Argilas – Aplicada às Argilas Brasileiras*. Editora Edgar Blucher LTDA, USP, São Paulo, SP *apud* JACINTHO, E. C. (2005) *Estudo do Comportamento de Misturas Solo-Emulsão para Uso em Barragens*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UnB, Brasília, DF.
- SENÇO, W. DE. (2001) *Manual de técnicas de pavimentação*. Ed. Pini, São Paulo, SP.
- SILVA, B. T. A.; SILVA, M. G. B.; BARROSO, S. H. A. (2008) Avaliação da Energia de Compactação no Desempenho de Mistura Produzida a partir de Agregados Reciclados para Emprego em Camadas Granulares dos Pavimentos. *Anais do XV Panamerican Conference Transport & Traffic Eng.* Cartagena das Índias, Colômbia.
- SILVA JÚNIOR, A W.; BARROSO, S. H. A.; CAVALCANTE, F. C. I. T.; RABÊLO, A. R. (2008) Estabilização Granulométrica de um Solo Típico da Região do Baixo Jaguaribe/CE em Função da Adição de Rio para Finalidades Rodoviárias. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. Búzios, RJ.
- SOARES, J. B. (2006) *Emulsões Asfálticas*. Notas de Aula da Disciplina Materiais Betuminosos, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, UFC, Fortaleza, CE.

- SOLIZ, V. V. P. (2007) *Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ.
- SOUZA JÚNIOR, J. D. (2005) *O Efeito da Energia de Compactação em Algumas Propriedades dos Solos do Estado do Ceará Utilizados em Pavimentação*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- SOUZA, M. J. N.; LIMA, F. A. M.; PAIVA, J. B. (1979) *Compartimentação Topográfica do Estado do Ceará*. Ciência Agrônômica. v. 9, p. 77-86.
- THULLER, R.B (2005) *Estudo de solos do Estado do Rio de Janeiro para aplicação em baixo volume de tráfego*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ.
- VILLIBOR, D. F. (1982) *Estabilização Granulométrica ou Mecânica*. Gráfica EESC – USP. São Carlos, SP.
- VOGT, J. C. (1971) Estabilização Betuminosa. 7º Simpósio sobre Pesquisas Rodoviárias. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, DNER, Rio de Janeiro apud MICELI JR, G. (2006) Comportamento de Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.
- WEATHERS, H. C. (1937) Sand Bituminous Stabilization. *Highway Research Board Proceedings*, vol. 17, part I, p. 521-530.
- YODER, E.J e WITCZAK, M.W. (1975) *Principles of Pavement Design* 2º edição, John Wiley & Sons, Inc , New York, Estados Unidos.
- .

ANEXOS

ANEXO 1 – ALGORITMO PARA A CONFECCÃO DOS GRÁFICOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

```

clear;
clc;
close all;

Sigma_3 = 0.020:0.01:0.140;
Sigma_d = 0.02:0.02:0.42;

[ xx, yy ] = meshgrid( Sigma_3, Sigma_d );
MR0 = 169.8 * ( xx .^ 0.11250 ) .* ( yy .^ -0.3189 );
MR7 = 507.0 * ( xx .^ -0.00458 ) .* ( yy .^ 0.2434 );
MR28 = 562.0 * ( xx .^ 0.03126 ) .* ( yy .^ 0.2780 );
%MRn = 562.0 * ( xx .^ 0.03126 ) .* ( yy .^ 0.2780 );

fig = figure( 'Name', strcat( 'Title' ) );
h0 = surf( xx, yy, MR0 );
hold all;
h7 = surf( xx, yy, MR7 );
h28 = surf( xx, yy, MR28 );
%hn = surf( xx, yy, MR28 );
legend( '0 dias', '7 dias', '28 dias' ); % 'n dias'

xlabel( 'sigma 3 (MPa)' );
ylabel( 'sigma d (MPa)' );
zlabel( 'MR (MPa)' );

set( h0, 'FaceColor', 'yellow' );
set( h7, 'FaceColor', 'green' );
set( h28, 'FaceColor', 'blue' );
%set( hn, 'FaceColor', 'red' );

```