

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DE MISTURA SOLO-EMULSÃO PARA A REGIÃO DE
URUCU (COARI-AM)

Eude de Paula Rebelo

ORIENTADORA: Prof^ª. Dra. Consuelo Alves da Frota

Manaus

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DE MISTURA SOLO-EMULSÃO PARA A REGIÃO DE
URUCU (COARI-AM)

Eude de Paula Rebelo

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil (M. Sc.).

ORIENTADORA: Prof^ª. Dra. Consuelo Alves da Frota

Manaus

2009

Ficha Catalográfica
(Catalogação realizada pela Biblioteca Central da UFAM)

Rebello, Eude de Paula

R289e Estudo de mistura solo-emulsão para a região de Urucu (Coari-AM) / Eude de Paula Rebello. - Manaus: UFAM, 2009.

115 f.; il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Amazonas, 2009.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Consuelo Alves da Frota

1. Solos - Estabilização 2. Pavimentação 3. Emulsão asfáltica I.
Frota, Consuelo Alves da II. Universidade Federal do Amazonas III.
Título

CDU 625.85(811.3)(043.3)

Dedico este trabalho aos meus pais, Valmir e Pedrina, pela formação firmada por meio do exemplo diário, onde foram passados conceitos que não fazem parte do conteúdo programático das disciplinas estudadas nos bancos escolares.

AGRADECIMENTOS

À Deus, em primeiro lugar e acima de qualquer coisa, por ter permitido que eu passasse por este processo engrandecedor dando coragem e perseverança para superar todos os contratemplos encontrados durante esta caminhada.

À minha família que sempre me apoiou, incentivou e educou para a vida. Em especial a minha querida mãe, Pedrina de Paula Rebelo, meu espelho pessoal, que mesmo não estando aqui entre nós, sempre foi minha inspiração em todos os momentos, saudades.

À minha orientadora, Consuelo Alves da Frota, por ter me recebido de braços e coração abertos, permitido que eu compartilhasse da sua sabedoria, pela cordialidade e atenção que sempre deu, pelas lições que me ensinou e, principalmente, por ter acreditado que eu era capaz.

Aos professores do mestrado em Engenharia Civil, pelos ensinamentos.

Aos colegas e amigos do grupo de Geotecnia – GEOTEC, Cleudinei, Diego, Reginaldo, Carmem, Maria das Graças, cuja amizade e convívio ao longo destes anos sempre ficarão como boas recordações.

À CAPES/FAPEAM pelo apoio financeiro.

À todos, que direta ou indiretamente, me ajudaram na concretização deste sonho.

Resumo da Dissertação submetida ao PPGEC/UFAM como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre (M.Sc.) em Engenharia Civil.

ESTUDO DE MISTURA SOLO-EMULSÃO PARA A REGIÃO DE URUCU (COARI-AM)

EUDE DE PAULA REBELO

OUTUBRO/2009

Orientadora: Consuelo Alves da Frota

O trabalho em pauta se ambienta na Província Petrolífera de Urucu, situada no Município de Coari – AM, área de extração de gás e petróleo da Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.), na qual a descoberta de poços de petróleo trouxe consigo a necessidade de aperfeiçoar os pavimentos locais, ante a sua deficiente resistência mecânica, devida à escassez de material granular regional. Nesta dissertação, estudou-se o comportamento de um solo siltooso, característico da região de Urucu, misturado à emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta (RL-1C), nos teores 0%, 1%, 2%, 5% e 8%, com tempo de aeração de 0 e 1h, e período de cura seca ao ar livre de 0 e 7 dias. Analisaram-se o solo natural e as misturas-emulsão pelos seguintes ensaios: de compactação, Índice de Suporte Califórnia, resistência à compressão simples e triaxial de cargas repetidas. Os resultados alusivos às misturas solo-emulsão revelaram (a) a contribuição quanto ao ganho de resistência (RCS), após sete dias de cura, (b) o excelente comportamento concernente à deformação, mostrado pelo ensaio de RCS, e (c) o melhor desempenho indicativo dos valores do módulo de resiliência (MR) para amostras sem aeração, quando confrontados com o solo natural.

Abstract of the Dissertation submitted to PPGEC/UFAM as part of the requirements for the obtaining of Master's title (M.Sc.) in Civil Engineering.

STUDY OF MIXTURE SOIL-EMULSION FOR THE AREA OF URUCU (COARI-AM)

EUDE DE PAULA REBELO

OUTOBRO/2009

Advisor: Consuelo Alves da Frota

This work is nested in the Urucu Oil Province. This province is located in the municipal district of Coari in the State of Amazonas, Brazil, and a Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.) area of oil and gas production, in which the discovery of oil brought about the need to improve the local pavement, in view of its deficient mechanical resistance, due to the shortage of granular material in the region. The behavior of the typical Urucu region silt soil mixed to 0%, 1%, 2%, 5% and 8% Cationic Slow Setting asphalt emulsion (CSS-1) and a 0h and 1h aeration time and a 0-day and 7-day outdoor dry curing period was studied herewith. Natural soil and emulsion mixtures were analyzed through the following tests: compaction, California Bearing Ration, Resistance to Compression and Triaxial Strength of repeated loads. The results relative to soil-emulsion mixtures showed (a) the contribution as to the gain in resistance (RCS), after seven curing days, (b) the excellent behavior *via-à-vis* the deformation exhibited under the RCS test, and (c) the best performance indicative of the values of the resilience module test (MR) for samples without aeration, when confronted with natural soil.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE SIGLAS.....	xiv
LISTA DE SIMBOLOS.....	xv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.1.1 Geral.....	17
1.1.2 Específicos.....	17
1.2 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	18
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	19
2.1.1 Estabilização mecânica e granulométrica.....	21
2.1.2 Estabilização química.....	22
2.2 EMULSÃO ASFÁLTICA.....	23
2.3 SOLO-EMULSÃO.....	29
2.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	37
2.4.1 Fatores que influenciam o módulo de resiliência dos solos.....	40
2.4.2 Comportamento dos solos granulares <i>versus</i> solos coesivos.....	42
2.4.3 Ensaio triaxial de cargas repetidas.....	44
CAPÍTULO 3 – CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DA REGIÃO DE URUCU	51
3.1 INTRODUÇÃO.....	51
3.2 CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DA REGIÃO DE URUCU.....	52

CAPÍTULO 4 – MATERIAS E MÉTODOS	56
4.1 ESCOLHA DOS MATERIAIS.....	56
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	58
4.3 CARACTERIZAÇÃO DA EMULSÃO ASFÁLTICA.....	58
4.4 DOSAGEM DA MISTURA SOLO-EMULSÃO.....	59
4.5 ENSAIOS MECÂNICOS.....	64
4.5.1 Ensaio de compactação e Índice de Suporte Califórnia (ISC).....	64
4.5.2 Resistência à compressão simples (RCS).....	65
4.5.3 Ensaio triaxial de cargas repetidas.....	67
CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS	71
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	71
5.1.1 Granulometria.....	72
5.1.2 Limites de consistência e massa específica dos grãos.....	73
5.2 CARACTERIZAÇÃO DA EMULSÃO ASFÁLTICA.....	76
5.3 COMPACTAÇÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA.....	77
5.3.1 Ensaio de compactação.....	77
5.3.2 Índice de Suporte Califórnia (ISC).....	81
5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	84
5.4.1 Moldagem dos corpos-de-prova.....	84
5.4.2 Resultados dos ensaios.....	85
5.5 TRIAXIAL DE CARGAS REPETIDAS.....	91
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	107
6.1 CONCLUSÕES.....	107

6.1.1	Ensaio de caracterização, compactação e ISC.....	107
6.1.2	Ensaio de resistência à compressão simples (RCS).....	108
6.1.3	Ensaio triaxiais de cargas repetidas.....	108
6.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Estágios da ruptura de uma emulsão asfáltica (JAMES, 2006 <i>apud</i> SANT’ANA, 2009).....	25
Figura 2.2:	Distribuição do filme betuminoso na massa de solo: 1 - grão de solo; 2 - vazios com ar; 3 - água intergranular; 4 - filme betuminoso; a – contato entre os grãos (KÉZDI, 1979 <i>apud</i> MICELI, 2006).....	31
Figura 2.3:	Primeiros modelos de tensão-deformação de solos no Brasil. (a) solo arenoso ou pedregulhoso e (b) solos argiloso ou siltoso (MEDINA e MOTTA, 2005).....	42
Figura 2.4:	Modelo esquemático de registro dos deslocamentos verticais – ensaio de carga repetida (MEDINA e MOTTA, 2005).....	45
Figura 2.5:	Tensões aplicadas e deslocamentos no ensaio de carga repetida (BERNUCCI <i>at al.</i> , 2007).....	45
Figura 3.1:	Localização da Província Petrolífera de Urucu (Coari) (GOOGLE EARTH, 2009).....	51
Figura 3.2:	Localização da Base de Operações Geólogo Pedro de Moura – Urucu (GOOGLE EARTH, 2009).....	52
Figura 3.3:	Macro regiões de solos amazônicos com potencial de uso geotécnico distinto (modificado - VERTAMATTI, 1987 <i>apud</i> PESSOA, 2004).....	54
Figura 4.1:	Jazida de Urucu.....	57
Figura 4.2:	Recipiente com emulsão asfáltica.....	57
Figura 4.3:	Processo da mistura solo-emulsão.....	63
Figura 4.4:	Compactador Proctor automático.....	64
Figura 4.5:	Equipamento para determinação do Índice de Suporte Califórnia.....	65
Figura 4.6:	Corpos-de-prova exposto ao ar livre.....	66
Figura 4.7:	Procedimento de moldagem para determinação da RCS.....	67
Figura 4.8:	Equipamento do ensaio triaxial dinâmico (Grupo GEOTEC).....	68
Figura 4.9:	Célula de confinamento triaxial (Grupo GEOTEC).....	68
Figura 4.10:	Procedimento para determinação do MR.....	69
Figura 5.1:	Curva granulométrica do solo.....	72
Figura 5.2:	Curva de compactação: solo natural e misturas com e sem aeração.....	78
Figura 5.3:	Teor de emulsão x média do peso específico aparente seco máximo.....	79

Figura 5.4:	Teor de emulsão x umidade ótima.....	80
Figura 5.5:	Resultados do ISC após imersão em água, com aeração.....	82
Figura 5.6:	Expansão x teor de emulsão após imersão.....	82
Figura 5.7:	Resultados dos ensaios de ISC sem imersão em água, com aeração.....	83
Figura 5.8:	Comparação dos resultados dos ensaios de ISC em água, com e sem imersão.....	83
Figura 5.10:	Padrão de ruptura após o ensaio de RCS.....	85
Figura 5.11:	RCS em função do tempo de cura, com aeração.....	85
Figura 5.12:	RCS em função do tempo de cura, sem aeração.....	86
Figura 5.13:	RCS em função do teor de emulsão e tempo de cura.....	86
Figura 5.14:	Deformação dos corpos-de-prova com aeração.....	87
Figura 5.15:	Deformação dos corpos-de-prova sem aeração.....	87
Figura 5.16:	Ganho em resistência pelo efeito da cura após 7 dias.....	88
Figura 5.17:	RCS em função da umidade para amostras sem cura.....	89
Figura 5.18:	RCS em função da umidade para amostras após cura.....	90
Figura 5.19:	RCS para os solos naturais e misturas solo-emulsão.....	91
Figura 5.20:	Umidade residual das amostras após ensaios com aeração.....	94
Figura 5.21:	Umidade residual das amostras após ensaios sem aeração.....	94
Figura 5.22:	Comparação das umidades residuais para as amostras com e sem aeração.....	95
Figura 5.23:	Módulo de resiliência para o solo natural – com aeração.....	96
Figura 5.24:	Módulo de resiliência para o solo natural após 7 dias – com aeração.....	96
Figura 5.25:	Módulo de resiliência para o solo natural – sem aeração.....	97
Figura 5.26:	Módulo de resiliência para o solo natural após 7 dias – sem aeração.....	97
Figura 5.27:	Módulo de resiliência para o solo natural em diferentes condições.....	98
Figura 5.28:	Módulo de resiliência para o solo com 1% de emulsão em diferentes condições.....	99
Figura 5.29:	Módulo de resiliência para o solo com 2% de emulsão em diferentes condições.....	99
Figura 5.30:	Módulo de resiliência para o solo com 5% de emulsão em diferentes condições.....	100
Figura 5.31:	Módulo de resiliência para o solo com 8% de emulsão em diferentes condições.....	100

Figura 5.32:	Gráficos comparativos do MR para ensaios de imediato – com aeração...	101
Figura 5.33:	Gráficos comparativos do MR para ensaios após 7 dias – com aeração....	102
Figura 5.34:	Gráficos comparativos do MR – com aeração.....	103
Figura 5.35:	Gráficos comparativos do MR para ensaios de imediato – sem aeração...	104
Figura 5.36:	Gráficos comparativos do MR para ensaios após 7 dias – sem aeração....	105
Figura 5.37:	Gráficos comparativos do MR – sem aeração.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Ensaio de classificação de emulsões asfálticas (BERNUCCI <i>at al</i> , 2007).....	28
Tabela 2.2:	Especificações para emulsões asfálticas (ABEDA, 2001).....	29
Tabela 2.3:	Requisitos dos solos para estabilização solo-emulsão (MICELI, 2006)....	34
Tabela 2.4:	Parâmetros de dosagens para estabilização solo-emulsão (MICELI, 2006).....	36
Tabela 2.5:	Pares de tensões para solos granulares, COPPE e DNER ME-131/94.....	47
Tabela 2.6:	Pares de tensões para solos argilosos e siltosos, norma DNER ME-131/94.....	47
Tabela 2.7:	Modelos de comportamento tensão-deformação de solos analisados no Brasil (MEDINA e MOTTA, 2005).....	48
Tabela 2.8:	Pares de tensões indicados pela norma AASHTO para ensaios triaxiais de cargas repetidas para solos de base e sub-base.....	49
Tabela 2.9:	Pares de tensões indicados pela norma AASHTO, para solos Tipo 2.....	50
Tabela 4.1:	Ensaio realizado na emulsão asfáltica.....	59
Tabela 4.2:	Valores de tensão desvio, tensão confinante e quantidade de ciclos por seqüência durante ensaio de determinação do módulo de resiliência.....	70
Tabela 5.1:	Distribuição granulométrica do solo.....	72
Tabela 5.2:	Teor de agregados e grau de alteração.....	73
Tabela 5.3:	Limites de Atterberg e massa específica dos grãos.....	74
Tabela 5.4:	Classificação geotécnica.....	75
Tabela 5.5:	Condição para estabilização solo-emulsão.....	75
Tabela 5.6:	Estudos solo-emulsão.....	76
Tabela 5.7:	Caracterização da emulsão RL-1C.....	77
Tabela 5.8:	Pesos específicos aparentes secos e umidades ótimas.....	78
Tabela 5.9:	Parâmetros do modelo composto – com aeração.....	92
Tabela 5.10:	Parâmetros do modelo composto – sem aeração.....	93

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
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
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
IME	Instituto Militar de Engenharia
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
LWT	Load Wheel Test
PEAS	Peso Específico Aparente Seco
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S/A
RCS	Resistência à Compressão Simples
RL	Emulsão Asfáltica de Ruptura Lenta
RM	Emulsão Asfáltica de Ruptura Média
RR	Emulsão Asfáltica de Ruptura Rápida
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solo
TRB	Transportation Research Board
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
WTAT	Wet Track Abrasion Test

LISTA DE SIMBOLOS

ε_r	Deformação resiliente
k_1, k_2, k_3, k_4, k_5	Coefficiente das equações de módulo resiliente
θ	Invariante de tensões
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais atuantes
σ_d	Tensão desvio atuante
R^2	Coefficientes de correlação

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O estudo em pauta ambienta-se na Província Petrolífera de Urucu, local de extração de gás e petróleo da Petrobras S.A., localizada no município de Coari, estado do Amazonas. Nessa região são produzidos mais de 50 mil barris de petróleo por dia e supera 1,5 mil toneladas diárias de gás de cozinha (GLP), além de 10,35 milhões de metros cúbicos de gás natural. A produção de GLP em Urucu abastece os estados do Pará, Amazonas, Rondônia, Maranhão, Tocantins, Acre, Amapá e parte do nordeste (PETROBRAS, 2009).

A região de Urucu se encontra, aproximadamente, a 650 km de Manaus, apresenta pluviosidade intensa, baixa capacidade de suporte dos seus solos superficiais e carência de material pétreo. Tais características dificultam e oneram as obras de pavimentação regionais. Em virtude disto, visou-se no presente estudar uma solução técnica-ambiental, e que, também, procurasse utilizar os materiais regionais disponíveis, como a estabilização química, onde a incorporação de emulsão asfáltica a um solo proporciona, via de regra, melhora a sua capacidade de suporte.

A estabilização química por meio da mistura de solo-emulsão é considerada uma solução alternativa à pavimentação, principalmente, em regiões onde existe ausência de agregados pétreos e elevado custo de transporte desses materiais granulares.

Segundo a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos – ABEDA (2001), a emulsão asfáltica foi introduzida no Brasil em 1962, pelo Engenheiro Químico Jean Claude Vogt. O desenvolvimento das emulsões asfálticas catiônicas trouxe vantagens indiscutíveis para a evolução na construção de pavimentação e, principalmente, para os serviços de conservação.

Segundo a ABEDA (2001), a estabilização solo-emulsão constitui uma excelente alternativa técnica de baixo custo, destacando-se, também, o seu baixo consumo energético, uma vez que a mistura dos materiais é executada a frio, quando da construção de camadas de um pavimento.

A estabilização química com misturas solo-emulsão tem se mostrado como solução à pavimentação. Santana (1971), citado por Soliz (2007), descreve aplicações de solo-emulsão em trechos no nordeste do Brasil com mais de 200 km de extensão. Na década de 1970, foram implantados, igualmente, alguns trechos de solo-emulsão em rodovias estaduais, consideradas em bom estado de uso após 20 anos de construção (TRULER, 2005).

Sant'Ana (2009), recentemente em sua experiência de campo, executou dois trechos experimentais para a avaliação do desempenho da mistura solo-emulsão em serviço. Verificou-se que, mesmo em rigorosos períodos chuvosos, permaneceram em boas condições de tráfego, sem qualquer manutenção, após dois anos de sua construção.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Estudar o comportamento mecânico de um solo ocorrente na Base Petrolífera Geólogo Pedro de Moura, quando adicionado à emulsão asfáltica do tipo RL-1C.

1.1.2 Específicos

- Caracterizar geotecnicamente o solo natural segundo os ensaios de granulometria, plasticidade, compactação e ISC;

- Analisar mecanicamente as misturas solo-emulsão de acordo com os ensaios de RCS e triaxial de cargas repetidas, variando os teores da emulsão RL-1C, tempo de cura e aeração.

1.2 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada nos seguintes capítulos:

Capítulo 1 – Introdução apresentando, principalmente, os objetivos desta dissertação.

Capítulo 2 – Expõe-se neste capítulo conceitos relacionados à estabilização de solos, estabilização química, emulsão asfáltica, misturas de solo-emulsão, e ao ensaio triaxial de cargas repetidas, relativo à determinação do módulo de resiliência.

Capítulo 3 – São apresentados aspectos fisiográficos, geológicos e, geotécnicos referentes à região de Urucu.

Capítulo 4 – Este capítulo descreve as características dos materiais utilizados, a descrição dos métodos de ensaios e procedimentos utilizados na fase experimental.

Capítulo 5 – Apresentação e análises dos resultados.

Capítulo 6 – Conclusões e sugestões.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo objetiva-se reunir conceitos fundamentais sobre a estabilização de solos, ressaltando o tratamento químico com uso de emulsão asfáltica. Especial atenção é destinada ao estudo de solos de granulometria fina, visando sua utilização em base e sub-base de um pavimento de baixo custo. Esta revisão bibliográfica apresenta os seguintes tópicos:

- Estabilização de Solos, onde são mencionados conceitos, tipos de estabilização de solos, pesquisas realizadas, dando-se enfoque à estabilização química no desempenho da técnica de estabilização com emulsão asfáltica;
- Emulsão Asfáltica, onde são descritos conceitos, características, classificações e aplicações de acordo com experimentos realizados;
- Solo-Emulsão, no qual são relatados aplicações, resultados decorrentes de experiências na construção de estradas, características das emulsões asfálticas e trabalhos realizados;
- Módulo de Resiliência, onde são abordados conceitos e procedimentos utilizados por diversos pesquisadores e instituições na execução deste ensaio.

2.1 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Estabilizar um solo significa melhorar sua resistência mecânica, visando suportar cargas e esforços induzidos pelo tráfego, normalmente aplicados sobre um pavimento, bem

como, garantir a constância destas melhorias no tempo de vida útil da obra, mediante as ações erosivas de agentes naturais e, sob as condições mais adversas de solicitação.

Vogt (1971) *apud* Soliz (2007) define a estabilização de solo como todo método que se destina ao aumento estável da resistência aos esforços do tráfego e aos efeitos exercidos pelas intempéries. Segundo Pinto (1985, *apud* JACINTHO, 2005) a estabilização de solo é o processo pelo qual há um beneficiamento do material, com o intuito do mesmo adquirir propriedades necessárias para o fim a que se destina. Esta técnica é bastante utilizada na construção de estradas e aeroportos, havendo maiores vantagens no aproveitamento do solo local, mesmo que artificialmente tratado, com a utilização de materiais de melhor qualidade, cuja obtenção exigiria maiores distâncias de transporte.

A estabilização de solos possibilita que um solo local não recomendado, para uso em pavimentação, tenha suas características de resistência e durabilidade melhoradas, permitindo-se, assim, seu emprego. Na estabilização de um solo têm-se com intuito modificar as propriedades que, segundo Medina e Motta (2004), são:

- Resistência ao cisalhamento, tornando-a menos sensível às variações ambientais, sobretudo, à umidade, além de torná-la compatível com as cargas que a estrutura vai absorver;
- Permeabilidade;
- Compressibilidade.

Dentre vários tipos de estabilização de solo, nenhum método se concentra genericamente em todos os solos devido à variedade dos mesmos (INGLES e METCALF, 1972 *apud* SOLIZ, 2007). Kézdi (1974), citado por Soliz (2007), enfatiza as propriedades que devem ser consideradas de modo a escolher o método de estabilização:

- Propriedades do solo na condição natural;
- Propriedades esperadas do solo estabilizado;
- Efeitos no solo estabilizado após a estabilização.

Os principais métodos e certamente as mais empregadas na estabilização, são: mecânica, granulométrica e a química. Cada um desses métodos, com seu respectivo mecanismo, serão detalhados a seguir dando-se ênfase a estabilização química, alvo deste trabalho.

2.1.1 Estabilização mecânica e granulométrica

A estabilização mecânica consiste basicamente no melhoramento de um solo, ou mistura de solos, dando uma condição de densidade máxima relacionada a uma energia de compactação e a uma umidade ótima. Constitui-se no método mais antigo e bastante utilizado na pavimentação, com aplicação de uma energia externa de compactação, onde ocorre uma diminuição dos vazios tornando o solo mais resistente aos esforços externos (MEDINA e MOTTA, 2004).

O ganho de resistência mecânica está relacionado à redução de volume de vazios. Segundo Santos *et al.* (1995), a estabilização mecânica, por compactação, refere-se ao processo de beneficiamento, ao qual um solo minimiza sua porosidade pela aplicação de sucessivas cargas.

A estabilização granulométrica por outro lado, incide na modificação das propriedades do solo por meio da adição ou retirada de um solo, com a finalidade de adequar a sua distribuição granulométrica. Em outras palavras, a distribuição de grãos com diferentes tamanhos faz com que os vazios dos grãos maiores sejam preenchidos pelas partículas

médias, e os vazios destas, pelos grãos menores (SENÇO, 2002). De acordo com Soliz (2007), a estabilização granulométrica busca alcançar um material densamente graduado e uma fração fina plástica limitada, com uma mistura íntima de dois ou mais solos.

2.1.2 Estabilização química

A estabilização química consiste na adição de um determinado produto químico ao solo, de modo a provocar alterações que venham a influenciar as suas propriedades quanto a: resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade (SANTOS *et al.*, 1995). Segundo a bibliografia citada, a adição de um ou mais produtos químicos, quando solidificam ou reagem com o solo, preenche os vazios e as partículas de solo ficam imersas como se fosse um material inerte de enchimento, tendo assim, um solo repelente à água. Segundo Jacintho (2005), na estabilização química os aditivos interagem com as partículas dos solos, estabelecendo uma melhora nas suas propriedades mecânica e hidráulica.

Para Medina (1987, *apud* SOLIZ, 2007), quando existe uma matriz contínua entre o agente estabilizador e o solo, os poros são todos preenchidos e as características mecânicas do estabilizador preponderam. Reações físicas (variação de temperatura, hidratação, evaporação e adsorção) e reações químicas (troca catiônica, precipitação, polimerização, oxidação, solução e carbonatação) são reações resultantes da combinação solo-estabilizador. Para uma matriz descontínua, ou seja, os vazios dos grãos não são todos preenchidos, três ações podem advir:

- Alteração das propriedades das superfícies das partículas;
- Vedação inerte dos poros;
- Interconexão das partículas de solo por pontos de contato.

O produto químico altera as relações solo-água, sobretudo nos solos argilosos. As partículas de argila de dimensões coloidais apresentam carga elétrica superficial de predominância negativa que atrai os cátions adsorvidos hidratados, de maneira que, ocorre uma variação na concentração de eletrólito na água (MEDINA e MOTTA, 2004).

Dentre vários produtos químicos utilizados na estabilização química, têm-se como os mais comumente utilizados: cal, cimento e emulsão asfáltica. Segundo Vogt (1971), citado por Miceli (2006), a emulsão é o principal agente da estabilização betuminosa, onde é dada ao solo arenoso coesão e impermeabilização ao solo argiloso, proporcionando ganho na resistência.

2.2 EMULSÃO ASFÁLTICA

Emulsão pode ser definida como a dispersão de pequenas partículas de um líquido num outro líquido, ou seja, a emulsão asfáltica é uma mistura do cimento asfáltico de petróleo (CAP) dispersos na fase água (ABEDA, 2001).

Quando o CAP é colocado em água (dois líquidos não miscíveis) existe uma tensão superficial entre eles formando uma mistura com duas fases – a fase dispersa e a fase contínua. Adicionando-se a essa mistura um agente emulsificante, a tensão superficial é, então, reduzida e glóbulos de um dos líquidos ficam dispersos no outro. Em uma emulsão asfáltica o CAP é a fase dispersa e a aquosa se constitui na fase contínua.

O cimento asfáltico é aquecido a uma temperatura que varia entre 140 a 145 °C e, a fase água a uma temperatura variando entre 50 a 60 °C, na qual já se encontram previamente dissolvidos os agentes emulsificantes, cujo principal propósito é evitar que as partículas de asfalto se aglomerem, mantendo as duas fases em equilíbrio, durante um período de tempo que pode variar de algumas semanas a alguns meses (ABEDA, 2001).

Segundo Castro (2003), obtêm-se emulsões com características físico-químicas particulares dependendo das propriedades químicas e estrutura molecular do emulsificante, pois o mesmo age nos seguintes fatores:

- Produz um abaixamento da tensão superficial entre o asfalto e a água;
- Estabiliza a emulsão, fixando-se na periferia dos glóbulos dispersos de asfalto, impedindo, assim, a sua aglomeração (coalescência), o que provocaria a ruptura da emulsão.

Para que ocorra a emulsificação, o CAP é colocado em um moinho coloidal, equipamento com alta capacidade de cisalhamento, ao qual é aplicada energia térmica e mecânica, obtendo-se um líquido homogêneo estável. De acordo com Castro (obra citada), para que esta mistura tenha uma estabilidade ao bombeamento, transporte e armazenamento, em temperatura ambiente, deve ser utilizada entre 33% a 42% de água, com 0,2% a 1,0% de agentes emulsificantes. Após a aplicação da emulsão asfáltica em campo ocorre a separação da fase água do asfalto, que é conhecida como ruptura da emulsão, servindo, também, como embasamento para a sua classificação quanto à velocidade de ruptura, que segundo o autor, depende:

- Tipo de emulsão;
- Reatividade/superfície específica dos agregados;
- Teor de umidade dos agregados;
- Temperatura dos materiais e do ambiente.

De acordo com Sant'Ana (2009), compreende-se por ruptura da emulsão asfáltica o processo de união (coalescência) dos glóbulos de CAP ao entrar em contato com a superfície de um agregado, onde parte da água existente na emulsão sendo adsorvida e a outra parte se evapora por ação de intempéries ou reações químicas, rompendo a estabilidade alcançada no processo de emulsificação.

No processo de ruptura da emulsão asfáltica (Figura 2.1) podem ser destacadas duas fases: a floculação e a coalescência.

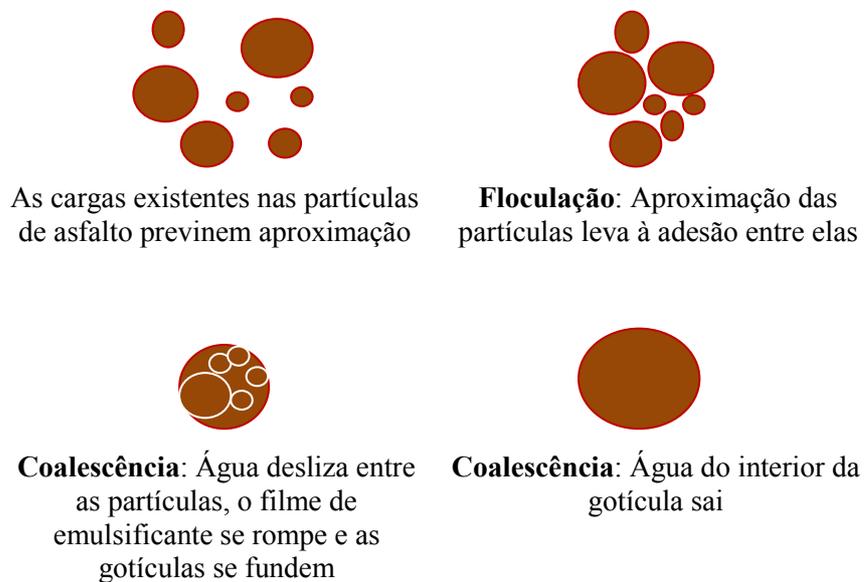


Figura 2.1 – Estágios da ruptura de uma emulsão asfáltica

FONTE: James, 2006 *apud* Sant'Ana, 2009

Segundo James (2006), os casos mais comuns de ruptura de emulsão podem ser:

- As cargas das partículas de emulsão são rapidamente destruídas pelas mudanças de pH, ocasionando uma rápida floculação quando, então, a coalescência inicia-se em velocidade lenta;

- Perda d'água, seja por evaporação ou por adsorção dos agregados, ocasionando uma aproximação das partículas de emulsão de tal modo que forças de atração predominam, levando à expulsão da água restante e iniciando o processo de coalescência.

O emulsificante é uma substância tenso-ativa, que reduz a tensão interfacial entre as fases asfáltica e aquosa. Suas moléculas são formadas de uma parte polar hidrofílica carregada positivamente (emulsão catiônica) e outra apolar lipofílica (SANT'ANA, 2009).

Segundo Miceli (2006), os emulsificantes utilizados na produção das emulsões são divididos em duas principais categorias: aniônico (emulsificante é um sabão com um ânion orgânico ligado a um álcali) e catiônico (emulsificante é um sal de amina). As emulsões asfálticas normalmente são classificadas:

a) em função da ruptura (tempo de evaporação da água)

- Ruptura Rápida (RR) – Indicada, principalmente, para pinturas de ligação em substituição aos asfaltos diluídos e em tratamentos superficiais, (40 min);
- Ruptura Média (RM) – Indicada para misturas com agregados graúdos, (até 2 h);
- Ruptura Lenta (RL) – Indicada para misturas com agregados miúdos (até 4 h).

b) em função da carga elétrica das partículas

- Emulsões Aniônicas – com partículas carregadas negativamente e com afinidade maior pelos agregados de natureza básica, calcários e dolomitos;

- Emulsões Catiônicas – com partículas carregadas positivamente e de maior afinidade com agregados de natureza ácida, como granitos e quartzitos. As catiônicas têm maior adesão às superfícies e são recomendadas em impermeabilizações e tintas;
- Emulsões Especiais – com partículas asfálticas sem cargas ou carregadas simultaneamente, positiva e negativamente.

As emulsões catiônicas e aniônicas são denominadas pela sua ruptura, viscosidade, teor de solvente e resíduo asfáltico, em:

- Emulsões de ruptura rápida catiônicas: RR-1C, RR-2C;
- Emulsões de ruptura rápida aniônicas: RR-1, RR-2;
- Emulsões de ruptura média: RM-1C, RM-2C, RM-1, RM-2;
- Emulsões de ruptura média aniônicas: RM-1, RM-2;
- Emulsões de ruptura lenta catiônicas: RL-1C.

As duas letras indicam o tipo de ruptura da emulsão (como mencionado), os números 1 e 2 estão associados à viscosidade relativa e a quantidade de cimento asfáltico, sendo o número maior correspondendo a uma maior viscosidade, podendo ser ou não seguida da letra C referente à emulsão catiônica.

A ruptura de uma emulsão é o fenômeno da separação das suas fases constituintes. Esta pode ocorrer por evaporação d'água, por um desequilíbrio elétrico (ocasionado por aumento da acidez ou alcalinidade) ou pela ação do agregado, o qual atrai para si, por meio de forças eletrostáticas, os glóbulos do asfalto. Uma característica visual da ruptura é a mudança de coloração da emulsão, que passa de marrom a preta (CASTRO, 2003).

Segundo ABEDA (2001), as emulsões asfálticas não só representam uma alternativa de economia energética (sem necessidade de aquecimento), como apresentam uma ótima afinidade com todos os tipos de agregados. Dentre outras, pode-se citar as seguintes vantagens das emulsões asfálticas: permitem uma estocagem à temperatura ambiente e em instalações simples que não exigem fonte de aquecimento, combustível derivados de petróleo e isolamento térmico (eliminando-se riscos de incêndios e explosões) e não geram vapores tóxicos e poluentes.

Para produção e comercialização das emulsões asfálticas são fixadas e exigidas características segundo as normas brasileiras, normatizadas pelo Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. As Tabelas 2.1 e 2.2 mostram as especificações das emulsões asfálticas para pavimentação seguindo das designações das classes em função: do tempo necessário para que ocorra a ruptura, dividida em lenta, média ou rápida; do teor de asfalto contido na mesma; e da carga iônica.

Ensaio de Classificação	Norma técnica reguladora
Ensaio de viscosidade Saybolt-Furol	NBR 14491
Ensaio de sedimentação	NBR 6570
Ensaio de peneiração	NBR 14393
Ensaio de resistência à água	NBR 6300
Ensaio de mistura com cimento	NBR 6297
Ensaio de mistura com filler silício	NBR 6302
Ensaio de carga de partícula	NBR 6567
Ensaio de destilação	NBR 6568
Ensaio de desemulsibilidade	NBR 6569

Tabela 2.1 – Ensaios de classificação de emulsões asfálticas

FONTE: Bernucci *at al.*, 2007

Características	Métodos		Tipos de Ruptura				
	ABNT	ASTM	Rápida		Média		Lenta
			RR-1C	RR-2C	RM-1C	RM-2C	RL-1C
a) Viscosidade Saybolt Furol, a 50 °C	NBR-14491	D 88	20 - 90	100 - 400	20 - 200	100 - 400	máx. 70
b) Sedimentação, % em peso máx.	NBR-6570	D 244	5	5	5	5	5
c) Peneiramento, 0,84mm, % em peso máx.	NBR-14393	D 244	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
d) Resistência à água, % mín, de cobertura:	NBR-6300	D 244					
agregado seco			80	80	60	60	60
agregado úmido			80	80	80	80	80
e) Mistura com cimento, % máx	NBR-6297	D 244	x	x	x	x	2
ou filer silicico	NBR-6302		x	x	x	x	1,2 - 2,0
f) Carga de partícula	NBR-6567	D 244	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva
g) pH, máx.	NBR-6299	-	x	x	x	x	6,5
h) Destilação:	NBR-6568	D 244					
solvente destilado, % em volume			0 - 3	0 - 3	0 - 12	3 - 12	nula
resíduo, mínimo, % em peso			62	67	62	65	60
i) Desemulsibilidade, % em peso, mín	NBR-6569	D 244	50	50	x	x	x
% em peso, máx.			x	x	50	50	x

Tabela 2.2 – Especificações para emulsões asfálticas

FONTE: ABEDA, 2001

2.3 SOLO-EMULSÃO

A estabilização solo-betume teve início quando engenheiros rodoviários em atividades de campo, próximos a postos petrolíferos, notaram que ao espalhar o óleo cru sobre as estradas de terra, diminuía o pó existente e aumentava a resistência aos rigores do tráfego e do tempo (ARAÚJO *et al.*, 1983).

As emulsões asfálticas somente foram utilizadas em 1930 por McKesson, sendo que antes, as utilizações de asfalto diluído de cura rápida e média eram bastante comuns na estabilização de solo (JACINTHO, 2005).

Santana (1971), citado por Soliz (2007), descreve aplicações de solo-emulsão (RL-1C), no nordeste do Brasil, para a construção de trechos na década de 1960, sendo considerada um sucesso com mais de 200 km de estabilização asfáltica.

Thuler (2005) relata experimentos realizados no Rio de Janeiro, na década de 1970, com implantações de alguns trechos de solo-emulsão em rodovias estaduais, apresentando-se em bom estado de uso após 20 anos de construção.

A eficácia da mistura do betume com o solo pode conduzir a vários efeitos, dentre os mais importantes, segundo Kézdi (1979, *apud* SOLIZ, 2007), são:

- Reforço de solos granulares não coesivos pela cimentação das partículas;
- Estabilização do conteúdo de água de solos finos coesivos, tornando-os impermeáveis e reduzindo a sua capacidade de absorção;
- Mudanças de solos, que somente possuem resistência ao atrito, em solos coesivos e impermeáveis.

Segundo Kézdi e Rétháti (1988, *apud* JACINTHO, 2005) ao combinar água e betume a um solo, inicia-se uma série de processos físicos e químicos que irão influenciar no seu desempenho mecânico. A finalidade da estabilização com material asfáltico é envolver as partículas individualmente com um filme betuminoso, que deve ser, por um lado, fino o suficiente para não diminuir a resistência por atrito e, por outro lado, grosso o bastante para promover adesividade entre os grãos, conforme mostra a Figura 2.2.

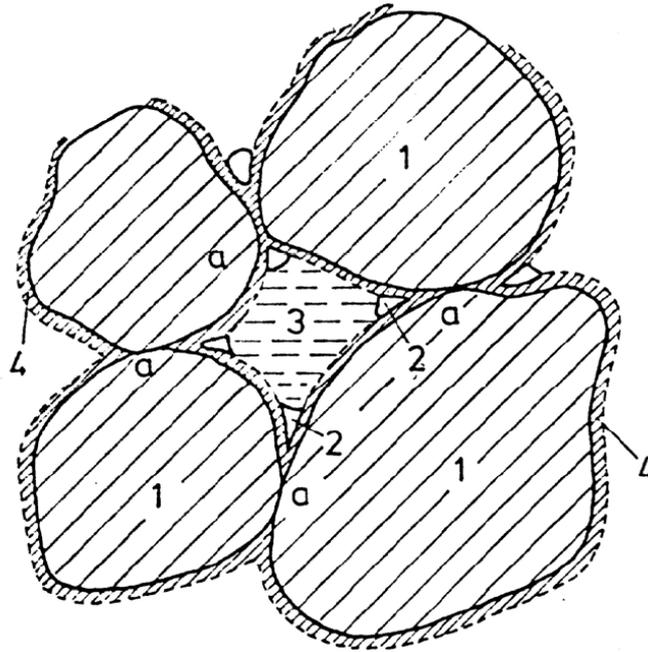


Figura 2.2 – Distribuição do filme betuminoso na massa de solo: 1 - grão de solo; 2 - poro com ar; 3 - água intergranular; 4 - filme betuminoso; a - contato entre os grãos

FONTE: Kézdi, 1979 *apud* Miceli, 2006

Segundo Ingles e Metcalf (1972, *apud* JACINTHO, 2005) o principal papel do material asfáltico é atribuir coesão e impermeabilização aos solos, sendo que para os solos arenosos é notado o aumento da coesão, enquanto para solos com granulometria fina a emulsão confere a impermeabilização, protegendo as partículas de argila do efeito da umidade, contribuindo, assim, para uma cimentação dos grãos (coesão) e conseqüentemente o aumento da resistência dos mesmos.

A estabilização solo-emulsão é influenciada pelo tipo e quantidade dos elementos formadores da mistura (solo, água e emulsão) e pelo processo utilizado para efetivação da mistura (JACINTHO, 2005). Discute-se a seguir os principais fatores interventores no processo de estabilização solo-emulsão.

a) Tipo de Solo

Com o objetivo de enquadrar os diferentes tipos de solos quanto à sua potencialidade para estabilização betuminosa, vários requisitos são mencionados por pesquisadores, os quais em sua grande maioria entram em consenso com a superioridade dos solos granulares no processo de estabilização de solos com betume. Comumente, essas condições referem-se aos limites de plasticidade máximos e a granulometria.

Segundo Jacintho (2005), as diferentes constituições químicas e mineralógicas dos solos exercem uma forte influência no processo de estabilização, bem como, na superfície específica das partículas, isto é, quanto maior a área superficial mais difícil será a estabilização com emulsão asfáltica.

Para solos granulares, a estabilização solo-emulsão pode ser aplicada de maneira satisfatória, sendo necessária a existência de material fino para o aumento do ângulo de atrito interno do material. Por outro lado solos altamente plásticos são insatisfatórios, e geralmente complicados de estabilizar decorrente da dificuldade da quebra dos torrões de argila e de misturar inteiramente a emulsão à massa de solo (YODER e WITCZAK, 1975).

Kézdi (1979) *apud* Miceli (2006) conclui que certos aspectos da microestrutura do solo têm influência no resultado do processo de estabilização. Por meio de ensaios físico-químicos em vários solos, o autor enfatiza as seguintes conclusões:

- A porcentagem de betume a ser adicionado no solo esta relacionado com a quantidade de sílica na argila, quanto maior o teor de sílica no solo maior a necessidade de betume (caso dos solos tropicais);
- Quanto mais compostos de ferro e alumínio presente na fração de argila, melhor será sua estabilização;

- O íon sódio, se presente no solo, sempre piora a resistência, enquanto que o íon cálcio dependendo de sua concentração, pode prejudicar ou melhorar o resultado de uma estabilização.

O autor, também, acrescenta os seguintes limites:

- O maior diâmetro das partículas não deve ultrapassar um terço (1/3) da espessura compactada da camada do solo tratado;
- A porcentagem em peso das partículas menores que 4,76 mm não devem exceder 50%;
- A porcentagem em peso das frações menores que 0,42 mm deve se situar no intervalo de 35% a 100%.

Ingles e Metcalf (1972), citado por Soliz (2007), faz referência para que ocorra uma boa estabilização: granulometria com mais de 50 % passando na peneira 3/16 polegadas, 10% a 50 % passando na peneira N° 200, limite de liquidez menor que 40 % e índice de plasticidade inferior a 18%. Contudo, os autores mencionam que a textura dos solos não é restritiva, de modo que, relatam experiências com o uso de solos com mais de 75 % passando na peneira n° 200 e limite de liquidez maior do que 50, onde obtiveram-se resultados satisfatórios.

Alguns autores, como mostrado na Tabela 2.3 (MICELI, 2006), apontam requisitos quanto às características granulométricas e os índices de plasticidade dos solos a serem empregados na estabilização solo-emulsão.

Tipo de solo	LL/LP do solo	% Passante # 0,074 mm	Fonte
Areias	IP máximo de 12 %	25 % máximo	
Pedregulhos e Areias pedregulhosas	IP máximo de 12 %	15 % máximo	YODER e WITCZAK (1975)
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 % a 50 %	KÉZDI (1979)
Solos em geral	IP máximo de 14 %	5 % máximo	VOGT (1971)
Solos arenosos		35 % máximo	
Solos argilosos	IP máximo de 6 % LL máximo de 30 %	35 % máximo	DER (1991)
Materiais britados		15 % máximo	ABEDA (2001)
Solos em geral	IP máximo de 8 %	20 % máximo	
Solos em geral		25 % máximo	ASTM (2006)

Tabela 2.3 – Requisitos dos solos para estabilização solo-emulsão

FONTE: Miceli, 2006

b) Teor de Água

Na estabilização de um solo com emulsão asfáltica verifica-se que a quantidade de água necessária é, em geral, menor do que o teor ótimo obtido nos ensaios de compactação, referente à energia do Proctor Normal para um solo natural (YODER e WITCZAK, 1975). Segundo os estudos realizados por Ferreira (1980) e Luciana *et al.* (1982), *apud* Jacintho (2005), a máxima tensão de ruptura era alcançada para corpos-de-prova com umidade próxima da umidade ótima. Em ambos os estudos foram utilizados diferentes teores de umidade, para cada teor de betume, e realizados ensaios de compressão simples e de tração indireta.

Segundo Vogt (1971) *apud* Soliz (2007), existem 3 teores de água críticos:

- O teor de água de dispersão – teor mínimo de água do solo abaixo do qual não é possível dispersar a emulsão no solo, mesmo quando ela está diluída. Este teor é geralmente da ordem de 3% a 5 %. Portanto, o solo deverá ser umedecido.
- O teor de água de diluição – pelo fato das emulsões serem muito viscosas e quando diluídas rompem-se mais lentamente, o que facilita a dispersão na massa do solo.
- O teor de água de compactação – o teor Proctor a ser considerado corresponde ao fluido total.

Mostra-se consenso entre os principais autores que estudaram a estabilização solo-emulsão que a emulsão asfáltica não deve ser misturada diretamente a solos secos ou solos com baixo teor de umidade (JACINTHO, 2005).

c) Teor e tipo de Emulsão Asfáltica

Na mistura de um solo com emulsão asfáltica são usados diversos teores, do material betuminoso, em geral, variando entre 0% a 10 %, sendo determinado o teor ótimo de emulsão em termos de resistência, por meio de ensaios de compressão simples, tração indireta ou Índice de Suporte Califórnia. O teor ótimo pode alterar de acordo com a característica do solo e tipo de emulsão, sendo que a mais utilizada e recomendada pelos fabricantes é a emulsão catiônica de ruptura lenta (RL-1C), (JACINTHO, 2005; PINTO, 1998 *apud* MICELI, 2006).

As emulsões asfálticas do tipo catiônicas são reconhecidas mundialmente pelo seu melhor desempenho no que se refere à compatibilidade com a maioria dos agregados minerais, de modo que são bastante empregadas na pavimentação (CASTRO, 2003).

Diversos solos brasileiros estabilizados com emulsão asfáltica já foram ensaiados em laboratório, concluindo que solos arenosos são estabilizáveis com baixos teores, enquanto solos argilosos necessitam de teores mais altos. Ainda, são inúmeros os métodos para projeto de misturas solo-emulsão e, cada um deles, possui um parâmetro de dosagem. A Tabela 2.4 mostra algumas destas fontes (MICELI, 2006).

Norma	Parâmetro de dosagem
DER 3.07/1988 (1988)	Hubbard – Field
ASTM D 422 (2006)	Estabilidade Marshall/Módulo de resiliência/Resistência à tração indireta
LUCENA <i>et al.</i> (1982)	Resistência à compressão simples/Resistência à tração indireta
GUARÇONI <i>et al.</i> (1988); MATTOS <i>et al.</i> (1991)	Índice de Suporte Califórnia (CBR)
ARAÚJO <i>et al.</i> (1983)	Ensaio triaxiais UU

Tabela 2.4 – Parâmetros de dosagem para estabilização solo-emulsão

FONTE: Miceli, 2006

d) Metodologia de Mistura

A obtenção de um bom resultado laboratorial depende significativamente do processo de mistura, ou seja, a metodologia tem uma grande influência no resultado da estabilização solo-emulsão. A literatura apresenta distintas metodologias de mistura de água, solo e emulsão asfáltica, onde as diferenças se referem à diluição da emulsão, tempo de aeração e a cura dos corpos-de-prova (JACINTHO, 2005).

Segundo Ferreira (1980), citado por Jacintho (2005), recomenda-se adição e homogeneização da água ao solo antes da aplicação da emulsão, posto que a água dificulta a ruptura prematura das emulsões, facilitando o processo da mistura.

A estabilização depende do período e temperatura de aeração. Tempo de aeração significa o período de descanso em que a mistura solo-emulsão é deixada ao ar antes da compactação, permitindo o processo de ruptura da emulsão. A aeração, antes da compactação, além de aumentar a estabilidade, diminui a absorção de água, em especial nos solos de granulação fina (INGLES e METCALF, 1972 *apud* JACINTHO, 2005).

A etapa de cura dos corpos-de-prova constitui-se na evaporação da água e do emulsificante, promovendo a cobertura da superfície das partículas pelo asfalto. Este processo de secagem é concretizado em estufa ou simplesmente ao ar livre. De acordo com Jacintho (2005), pesquisas no Brasil indicaram secagens em estufa (24 h a 40 °C e a 60 °C) e no período de 7 dias ao ar livre.

2.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O Módulo de Resiliência (MR) equivale ao módulo de elasticidade E , sendo ambos definidos como relação entre σ (tensão) e ε (deformação). No caso do parâmetro resiliente sua determinação utiliza-se de ensaio de cargas repetidas. Apesar deste enfoque descuidar dos efeitos da perda de energia, o uso da resposta resiliente parece produzir resultados satisfatórios em cálculos de σ e ε de um pavimento (BARKSDALE *et al.*, 1997 *apud* MARQUES, 2004).

O termo resiliência foi proposto pelo engenheiro norte-americano Francis Hveem, em 1955, quando sistematizou a observação dos defeitos dos revestimentos, concluindo que muitos deles tinham origem na fadiga, ou seja, na repetição das pequenas deformações elásticas. Segundo o autor, o trincamento progressivo dos revestimentos se devia à deformação resiliente (elástica) das camadas subjacentes, principalmente o subleito. O termo resiliência significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é

devolvida quando são interrompidos as tensões causadoras das deformações (MEDINA e MOTTA, 2005).

Na Mecânica dos Pavimentos define-se a deformação resiliente como a deformação elástica recuperável dos solos e das estruturas dos pavimentos, sob a ação de cargas repetidas. Os pesquisadores Seed e Fead, da Universidade da Califórnia, desenvolveram, na década de 1950, um equipamento triaxial dinâmico e estabeleceram técnicas de ensaios de compressão triaxial com cargas repetidas, com o propósito de determinar o módulo de resiliência para fins rodoviários, que serviu de base para os modelos atuais (GUERREIRO SANTOS, 1998).

O comportamento dos solos em ensaios de cargas repetidas tem sido bastante estudado por diversos pesquisadores. Os solos são submetidos à cargas repetidas de duração e frequência comparáveis as que ocorrem nos pavimentos. O módulo de resiliência é determinado pela seguinte equação:

$$M_R = \sigma_d / \varepsilon_r \quad (2.1)$$

Onde:

M_R = Módulo de Resiliência (MPa ou kgf/cm²)

σ_d = tensão desvio axial repetida ($\sigma_1 - \sigma_3$) (MPa ou kgf/cm²)

ε_r = deformação recuperável (elástica ou reversível)

$$\varepsilon_r = \Delta h / h_0 \quad (2.2)$$

Onde:

Δh = deslocamento axial recuperável ou resiliente;

h_0 = altura inicial do corpo-de-prova.

A tensão vertical ou tensão desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$) é aplicada no corpo-de-prova sempre no sentido de compressão, de forma cíclica, gerando um carregamento e descarregamento, de acordo com a magnitude e a frequência que se deseja, enquanto a tensão confinante (σ_3) permanece constante.

Segundo Silva (2003), o método de dimensionamento de pavimentos norte-americano, AASHTO (1993), reconhece como de grande importância o módulo de resiliência dos materiais no dimensionamento de estruturas de pavimentos. Este método aconselha substituir o índice CBR e outros valores de resistência de materiais pelo módulo de resiliência, fundamentado nos seguintes motivos:

- Apresenta uma propriedade básica do material a qual pode ser utilizada na análise mecânica de sistemas de múltiplas camadas;
- Método aceito internacionalmente para caracterizar materiais visando o projeto de pavimentos e para a avaliação de desempenho de pavimentos;
- Existem técnicas disponíveis para estimar o módulo de resiliência em campo, por meio de testes rápidos e não destrutivos.

Os estudos sobre resiliência realizados no Brasil deram início na COPPE/UFRJ em 1977. Duas referências foram fundamentais: o *Special Report 162* do *Transportation Research Board* (TRB) publicado em 1975 e a tese de Hicks (1970) para o estudo de resiliência de solos (MEDINA e MOTTA, 2005). Obteve-se, também, um grande número de informações sobre o comportamento resiliente dos solos brasileiros, por meio de dissertações de mestrado e teses de doutorado.

2.4.1 Fatores que influenciam o módulo de resistência dos solos

De acordo com estudos realizados por Preussler (1978) e Svenson (1980), citados por Miceli (2006), alguns fatores que influenciam o comportamento resiliente de solos, são:

- Tensão confinante (σ_3);
- Razão de tensões principais (σ_1/σ_3);
- Tensão desvio (σ_d);
- História de tensões;
- Duração e frequência da tensão desvio;
- Grau de saturação;
- Tipo do agregado;
- Graduação das partículas;
- Energia de compactação;
- Densidade e umidade de compactação;
- Número de aplicações da carga.

Svenson (1980), citado por Chaves (2000), relata alguns fatores classificados como principais, ou seja, que apresentam maior influência nas características das deformações permanente e recuperável e/ou na relação entre o módulo de resiliência versus tensão-desvio. Como secundários fatores que visam dar subsídios no desenvolvimento dos estudos daqueles fatores principais. Comentam-se, a seguir, alguns desses fatores principais que podem afetar o comportamento resiliente dos solos granulares e coesivos.

a) Fatores que afetam o módulo de resiliência dos solos granulares:

- Número de repetições da tensão-desvio, que é função do índice de vazios, da densidade do material, do grau de saturação e do valor da tensão repetida aplicada;
- Histórico de tensões, relativas às deformações permanentes iniciais. Os solos não coesivos adquirem rigidez por meio da repetição do carregamento. Em um dado momento o solo apresenta comportamento quase elástico com MR constante;
- Duração e frequência do carregamento, sendo a primeira em função da velocidade dos veículos e a segunda das condições de tráfego;
- Nível de tensão aplicada, variando muito com a pressão confinante em solos não coesivos e pouco com a tensão desvio.

b) Fatores que afetam o módulo de resiliência dos solos finos coesivos:

- Número de repetição da tensão-desvio e do histórico de tensões, com o carregamento repetido ocorre o rearranjo estrutural levando a um acréscimo do peso específico;
- Duração e frequência de aplicação das cargas, no caso de frequências entre 20 e 60 aplicações por minuto, com duração entre 0,86 e 2,86 segundos, não mostram influência no comportamento;
- Umidade e peso específico de moldagem, quanto maior o teor de umidade menor o módulo de resiliência;
- Tixotropia dos solos argilosos, após algumas repetições de carga o ganho de rigidez não é significativo;
- Nível de tensão varia pouco com a tensão confinante e muito com a tensão desvio.

2.4.2 Comportamento dos solos granulares *versus* solos coesivos

O comportamento dos solos granulares e coesivos mostra-se distinto quando submetidos a ensaios triaxiais dinâmicos, ambos podendo ser afetados por vários fatores. A eliminação ou redução da influência de alguns deles é possível por meio da utilização de um adequado método de preparação de amostras, bem como um ensaio onde se procure submeter o solo a condições similares às encontradas em campo.

O desempenho de solos granulares sob carregamento repetido depende fundamentalmente do nível de tensões aplicado. Estudos têm se desenvolvido visando obter modelos de comportamento tensão-deformação utilizando o ensaio triaxial dinâmico (Figura 2.3).

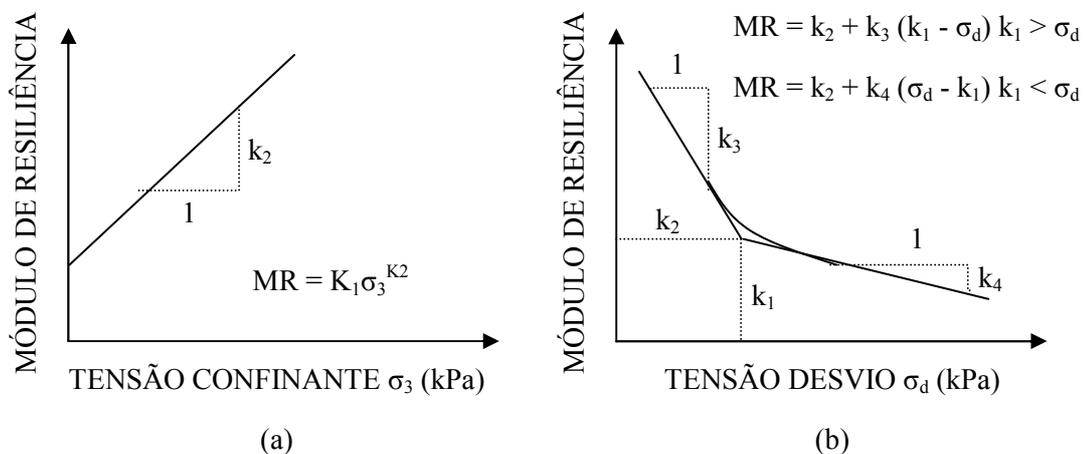


Figura 2.3 – Primeiros modelos de tensão-deformação de solos do Brasil. (a) solo arenoso ou pedregulhoso e (b) solos argiloso ou siltoso

FONTE: Medina e Motta, 2005

Quando esses materiais são submetidos a estados de tensões longe da ruptura, a deformação permanente (irrecuperável) diminui a cada repetição de carga e, eventualmente, sob condições drenadas, o comportamento chega a ser quase completamente resiliente

(recuperável). Sob condições não drenadas as deformações resiliente e permanente podem sofrer modificações pelas mudanças na poro-pressão.

Entretanto, como os solos granulares possuem baixa superfície específica é de se esperar que a umidade e a pressão de sucção não tenham a mesma importância que é dada ao estudo dos solos finos argilosos. Por outro lado, as pressões intergranulares de contato passam a ter maior importância e, conseqüentemente, o módulo de resiliência é influenciado pela tensão confinante (GUERREIRO SANTOS, 1998).

Nos solos finos, observa-se, em geral, que: o modelo preponderante é o que relaciona o módulo com a tensão-desvio axial repetida (σ_d), quando compactados na umidade ótima, tais solos apresentando um comportamento elástico não linear. As deformações resilientes diminuem com o número de repetições de carga, tendo o decréscimo nesse parâmetro com o aumento da umidade de compactação.

Segundo Preussler (1978) *apud* Chaves (2000), “quando um determinado solo não coesivo (areia ou pedregulho) é submetido a um carregamento repetido, grandes deformações permanentes ocorrem durante os primeiros ciclos da carga, como conseqüência de movimentos relativos entre partículas, ou fratura das mesmas nos pontos de contato. Com a repetição de carregamento, o material adquire rigidez e as deformações permanentes ao final de cada ciclo da carga aplicada diminuem até tornarem-se muito pequenas ou nulas. A partir deste instante, o solo apresenta um arranjo estável de partículas e um comportamento quase elástico no sentido de que toda a deformação nele causada pelo carregamento é recuperável quando este é retirado. Nestas condições o módulo do material torna-se aproximadamente constante.”

Determina-se o módulo de resiliência de um solo para fins de pavimentação por meio do ensaio triaxial de cargas repetidas, sendo regido pela norma do DNIT ME-131/94 (Solos – Determinação do módulo de resiliência) e pela norma americana AASHTO T 307-99 (2003).

2.4.3 Ensaio triaxial de cargas repetidas

A estrutura de um pavimento está sujeita a cargas cíclicas com diferentes magnitudes e frequências variáveis. Visando uma adequada representação desta solicitação dinâmica nos pavimentos e das propriedades elásticas dos materiais constituintes das camadas, comumente indica-se o ensaio triaxial de cargas repetidas (ou dinâmico), pois reproduz em laboratório as condições de carregamento mais próximas aquelas impostas pelo tráfego (SILVA, 2003).

Realiza-se o ensaio triaxial habitualmente com a tensão confinante σ_3 constante e tensão σ_1 variável,

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_d \quad (2.3)$$

onde σ_d é a tensão desvio variável.

O experimento tem necessariamente duas fases: a) a primeira chamada fase de condicionamento, onde se pretende diminuir a influência das grandes deformações plásticas e reduzir o efeito do histórico de tensões, se resume numa seqüência de carregamentos dinâmicos que permite dotar o material de uma condição de pré-adensamento; b) na segunda fase do ensaio, os valores do módulo de resiliência são determinados, para cada par de tensões σ_1 e σ_3 aplicado, bem como mede-se a deformação resiliente. Calcula-se, então, o módulo de resiliência, obtendo-se, por regressão linear, as constantes k_i dos modelos de comportamento resiliente adotados.

A amplitude e tempo de aplicação das cargas repetidas são determinados em função da velocidade dos veículos e da espessura do pavimento. No caso da frequência de aplicação da carga relaciona-se com as condições de fluxo dos veículos na estrada (SILVA, 2003).

Neste trabalho, particularmente, os ensaios foram realizados aplicando-se carga semi-senoidal, por se aproximar da forma de carregamento correspondente à uma passagem de roda para um tempo de 0,1 segundo e repouso de 0,9 segundo (Figuras 2.4 e 2.5). Nos experimentos são utilizadas diferentes tensões de confinamento (σ_3), dada por pressão de ar dentro da célula, e tensões solicitantes (σ_1) aplicadas pela célula de carga.

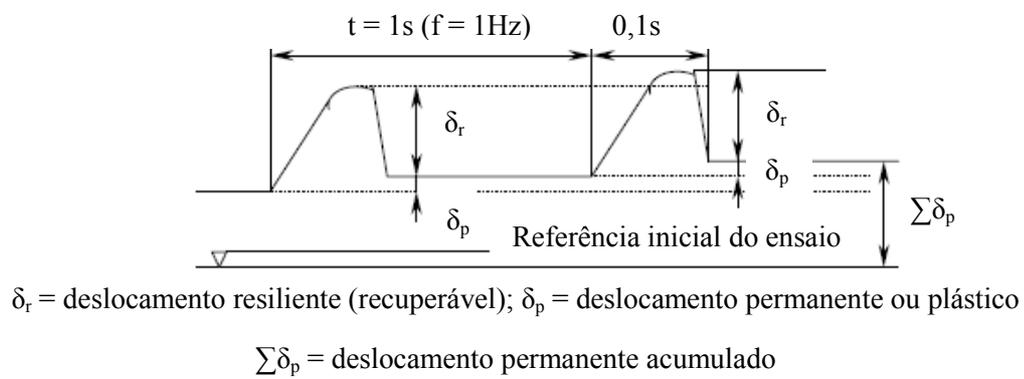


Figura 2.4 – Modelo esquemático de registro dos deslocamentos verticais – ensaio de carga repetida
 FONTE: Medina e Motta, 2005

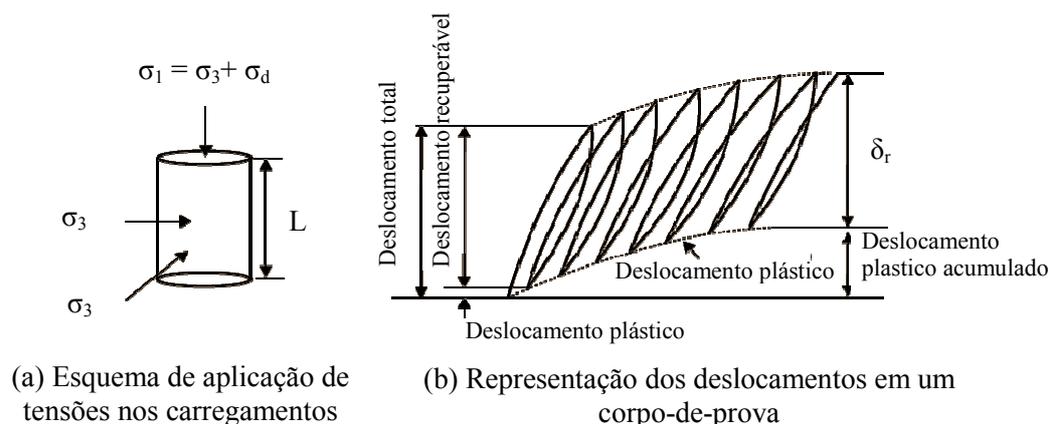


Figura 2.5 – Tensões aplicadas e deslocamentos no ensaio de carga repetida
 FONTE: Bernucci *et al.*, 2007

O módulo de resiliência está intimamente ligado ao tipo de material, sua constituição mineralógica, textura, plasticidade, umidade, densidade e estado de tensões. O ensaio é usualmente realizado na umidade ótima e na condição de drenagem livre (RAMOS, 2003). Os resultados dos ensaios triaxiais dinâmicos indicam que, em geral, o módulo de resiliência depende principalmente: nos solos arenosos da tensão de confinamento σ_3 , e nos solos argilosos da tensão desvio σ_d .

Os primeiros ensaios realizados no Brasil para solos (arenosos e argilosos) utilizando-se de diferentes pares de tensão, serviram de base para a normalização do DNER (atual DNIT) em 1986, que resultou no método atual DNER ME 131/94. Os resultados disponíveis sobre as características resilientes dos solos tropicais é ainda reduzida, embora a maior contribuição ao assunto deva-se ao grupo da COPPE/UFRJ, liderada pelo Prof. Jacques de Medina e Motta. Estes recomendaram uma classificação dos solos tropicais quanto à resiliência, distinguindo modelos de comportamento para cada solo (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Com base nos estudos realizados por Motta *et al.* 1990 (*apud* MEDINA e MOTTA, 2005), são apresentados os pares de tensão na Tabelas 2.5, para solos arenosos e pedregulhosos, e na Tabela 2.6 para solos argilosos e siltosos. Entretanto, não há justificativa quando se adota para solos argilosos sete níveis diferentes de tensão desvio e uma tensão confinante. Segundo o artigo de Motta (obra mencionada), nos solos tropicais a quantidade de finos nem sempre dita o desempenho tensão-deformação não linear do solo, causando o rompimento prematuro dos corpos-de-prova ao utilizar o conjunto proposto na Tabela 2.6. Deste modo, é preferível ensaiar todos os materiais sob o mesmo conjunto de pares de tensões que considerem a variação de ambas as tensões, semelhante aos solos arenosos (18 pares de tensões).

σ_3 (kgf/cm ²)	σ_a (kgf/cm ²)	σ_1 / σ_3
0,210	0,210	2,00
	0,420	3,00
	0,630	4,00
0,350	0,350	2,00
	0,700	3,00
	1,050	4,00
0,525	0,525	2,00
	1,050	3,00
	1,575	4,00
0,700	0,700	2,00
	1,400	3,00
	2,100	4,00
1,050	1,050	2,00
	2,100	3,00
	3,150	4,00
1,400	1,400	2,00
	2,800	3,00
	4,200	4,00

Tabela 2.5 – Pares de tensões para solos granulares

FONTE: DNER ME-131/94

σ_3 (kgf/cm ²)	σ_a (kgf/cm ²)	σ_1 / σ_3
0,210	0,210	2,00
	0,350	2,67
	0,525	3,50
	0,700	4,33
	1,050	6,00
	1,400	7,67
	2,100	10,00

Tabela 2.6 – Pares de tensões para solos argilosos e siltosos

FONTE: DNER ME-131/94

Cada solo possui um comportamento elástico linear diferente, ou seja, o módulo de resiliência poderá ser expresso como uma função do estado de tensões aplicado durante o ensaio, por modelos matemáticos com constantes experimentais. De modo que, diversos modelos foram propostos como mostra a Tabela 2.7 (MEDINA e MOTTA, 2005).

Equação	Modelo
$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2}$	Arenoso
$MR = k_2 + k_3(k_1 - \sigma_d)$, para $\sigma_d < k_1$ $MR = k_2 + k_4(\sigma_d - k_1)$, para $\sigma_d > k_1$	Argiloso
$MR = k_2 + k_3(k_1 - \sigma_d) \sigma_3^{k_5}$, para $\sigma_d < k_1$ $MR = k_2 + k_4(\sigma_d - k_1) \sigma_3^{k_5}$, para $\sigma_d > k_1$	Combinado
$MR = k_1 \theta^{k_2}$, para $k_2 > 0$	Areno-Argiloso
$MR = k_1 \sigma_d^{k_2}$, para $k_2 < 0$	Areno-Argiloso
$MR = k_1$	Constante
$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$	Composto

Tabela 2.7 – Modelos de comportamento tensão-deformação de solos analisados no Brasil

FONTE: Medina e Motta, 2005

A norma de ensaio AASHTO T 307-99 (2003) utiliza os pares de tensões indicadas nas Tabelas 2.8 e 2.9, segundo o tipo de material, definido como:

- Tipo 1: inclui todos os materiais destinados a camadas de bases, sub-base e os de subleito que apresentarem menos de 70 % passando na peneira de 2 mm e no máximo 20 % passando na peneira 75 μ m, com índice de plasticidade menor que 10. Concernente a este tipo, os pares de tensões aplicados constam na Tabela 2.8, para base e sub-base.

σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_1 / σ_3
20,7	20,7	2
	41,4	3
	62,1	4
34,5	34,5	2
	68,9	3
	103,4	4
68,9	68,9	2
	137,9	3
	206,8	4
103,4	68,9	1,6
	103,4	2
	206,8	3
137,9	103,4	1,7
	137,9	2
	275,8	3

Tabela 2.8 – Pares de tensões indicados pela norma AASHTO para ensaios triaxiais de cargas repetidas para solos de base e sub-base

- Tipo 2: são todos os materiais que não se incluem na definição de solo Tipo 1, podendo ser de amostras indeformadas ou moldados em corpos-de-prova de 70 mm a 100 mm de diâmetro, visando este tipo os pares de tensões aplicados são mostrados na Tabela 2.9 aplicando-se a solos arenosos e argilosos.

As chamadas tensões de condicionamento são aplicadas antes de se fazer as leituras para o cálculo do MR. Na prática brasileira usam-se os seguintes pares de tensões (σ_3 ; σ_d): (20,7; 20,7 kPa), (68,9; 68,9 kPa) e (103,4; 309 kPa), aplicando-se 500 repetições de cada uma. No caso da norma americana, aplicam-se de 500 a 1000 ciclos de um único par de tensões (41,4 kPa e 247,6 kPa), para solo de subleito, e igual a 103,4 kPa e 103,4 kPa, para material de base e sub-base. No caso das leituras de deformação específicas, correspondente

aos pares de tensões aplicadas, se fazem após 10 e 100 repetições de carga, para norma brasileira e americana, respectivamente.

σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_1 / σ_3
41,4	13,8	1,3
	27,6	1,7
	41,4	2
	55,2	2,3
	68,9	2,7
27,6	13,8	1,5
	27,6	2
	41,4	2,5
	55,2	3
	68,9	3,1
13,8	13,8	2
	24,8	2,8
	37,3	3,7
	49,7	4,6
	62,0	5,4

Tabela 2.9 – Pares de tensões indicados pela norma AASHTO, para solos Tipo 2

CAPÍTULO 3

CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DA REGIÃO DE URUCU

3.1 INTRODUÇÃO

Urucu situa-se na selva Amazônica, particularmente no município de Coari, nas coordenadas 5° de Latitude Sul e 65° de Longitude Oeste, a 650 km de Manaus. A área pertence ao pólo de produção de gás natural e petróleo da Petrobras S. A., denominado Base de Operações Geólogo Pedro de Moura (Figuras 3.1 e 3.2).

As primeiras tentativas de encontrar petróleo na Amazônia datam do início do século passado, sendo primeiro poço perfurado em 1917 pelo Serviço Mineralógico do Brasil (SMG), órgão do governo federal criado em 1905 para localizar jazidas de carvão e outros combustíveis. Somente em 1948 foram iniciados os primeiros levantamentos sísmicos na região, com o objetivo de encontrar especificamente gás natural e petróleo (PETROBRAS, 2009).



Figura 3.1 – Localização da Província Petrolífera de Urucu (Coari)

FONTE: Google Earth, 2009



Figura 3.2 – Localização da Base de Operações Geólogo Pedro de Moura – Urucu

FONTE: Google Earth, 2009

Em 1986 todos esses esforços vieram a ser recompensados com a descoberta de óleo e gás em níveis comerciais na região, localizada próximo ao rio Urucu. Conseqüentemente, o desenvolvimento de um projeto para colocar a área rapidamente em produção exigiu grande esforço e capacitação técnica, além de profundo conhecimento regional, sendo que em dois anos, especificamente 1988, começava a produção comercial na Província Petrolífera de Urucu (PETROBRAS, 2009).

3.2 CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DA REGIÃO DE URUCU

Na classificação de Köppen (1948, *apud* Relatório Urucu – UFAM/PETROBRAS, 2004), citado por Vieira *et al.* (2005), o clima referente a região de Urucu apresenta as seguintes características: quente e úmido precipitações anuais em torno de 2.350 mm temperatura média anual de 27,8°C com média mínima de 22,6°C e máxima de 32,8°C umidade relativa do ar com média anual de 82%. Essa condição climática é responsável pela presença da vegetação Ombrófila Densa, na qual, encontra-se pouco alterada, exceto nas margens das estradas que compreende o Complexo Petrolífero de Urucu.

A Floresta Amazônica Tropical densa recobre quase todo o estado, com pequenas manchas de campos e cerrados. Por ocorrer em áreas de clima quente com pluviosidade elevada, a região de Urucu apresenta além de uma vegetação densa, um relevo em forma de topos tabulares de longa extensão intercalados por pequenas colinas, como a Depressão Norte - Amazônica e a Depressão da Amazônia Ocidental (VIEIRA *et al.*, 2005).

Geograficamente a Região Amazônica caracteriza-se pela ocorrência de solos com gêneses e peculiaridades distintas, segundo Vertamatti (1987) citado por Pessoa (2004), dentre os quais se destacam os solos:

- Podzólicos, apresentam perfis desenvolvidos e se encontram moderadamente intemperizados;
- Latossólicos, são bem intemperizados e com características de materiais lateríticos, podendo apresentar concreções ferruginosas de elevada resistência;
- Hidromórficos, desenvolvem-se sob influência de lençol freático elevado, em zonas de topografia plana, podendo apresentar acúmulo de húmus ou concreções de óxidos de ferro em determinados pontos na zona de oscilação de água;
- Aluviais, constituem-se em sedimentos de origem fluvial, sendo fonte de extração de areia e seixo rolado.

A área de estudo, alusiva a região da Base de Operações Geólogo Pedro de Moura, situa-se na bacia do rio Solimões, constitui-se de argilitos, siltitos finos a médios, com intercalações de linhitos, eventualmente com intercalações de camadas de gipsita e carbonatos. Desde o terciário, tais rochas submeteram-se a um intenso intemperismo laterítico, assim como à pedogênese, o que modificou suas principais características geotécnicas, como, por exemplo, a coesão, tornando-se muitas vezes comparáveis às das

unidades quartenárias inconsolidadas, além de originar uma extensa cobertura de solo residual sobre as referidas rochas (FROTA *et al.*, 2006).

A Figura 3.3 mostra a divisão da região amazônica, relativa a diferentes tipos de solo e aptidões geotécnicas distintas. A Bacia Podzólica do Solimões, com abundância de solos finos e com uso potencial em estabilização, e a Região Latossólica do Amazonas, onde se encontram vários tipos de solos e agregados que podem ser usados na estrutura de pavimentos “*in natura*”.

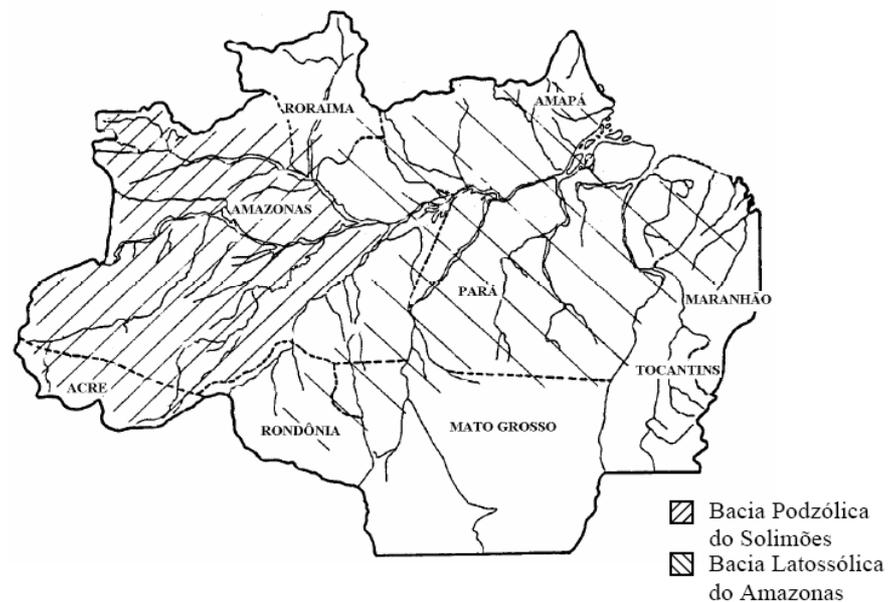


Figura 3.3 – Macro regiões de solos amazônicos com potencial de uso geotécnico distinto

FONTE: modificado – Vertamatti, 1987 *apud* Pessoa, 2004

Devido às suas características geológicas, a região de Urucu apresenta solos superficiais de granulometria fina, e carência de material granular apropriado para construção de pavimentos. Os materiais finos são mais sensíveis às variações de umidade, perdendo a capacidade de suporte devido à infiltração de água, o que pode ser considerado um problema em regiões caracterizadas por altos índices pluviométricos.

As estradas de Urucu recebem um processo de terraplanagem, que por sua vez por apresentam solos com valores elevados de silte e areia (em torno de 85%), tornam-se bastante susceptível a erosão. Um fato positivo na região vem sendo desenvolvido pela Petrobras de vários projetos de recuperação e monitoramento das vias, no sentido de resolver os problemas gerados pela terraplanagem, onde são abertas novas estradas seguindo um padrão que envolva a preocupação em se evitar problemas ambientais de forma mais intensa (VIEIRA *et al.*, 2005).

Segundo Frota *et al.* (2006), o solo local possui alta plasticidade e baixa capacidade de suporte. Com ausência de material pétreo (agregados) para a construção das estradas da base petrolífera de Urucu, segundo os citados autores o conjunto de tais fatores propicia as aludidas estruturas falência estrutural precoce, gerando altos custos principalmente de manutenção.

Pessoa (2004) desenvolveu um projeto de pesquisa na região de Urucu, no qual procurou caracterizar o solo local a fim de melhorar seu comportamento. O autor pesquisou várias formas de melhorar o desempenho do solo, no que se diz respeito à capacidade de suporte e expansão por meio da estabilização, entre elas a estabilização química (emulsão e cal) e a granulométrica (areia). Dentre os teores analisados, a adição de 4% de cal mostrou-se satisfatória e serviu de base para os ensaios dessa pesquisa.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o programa de experimentos laboratoriais realizado no Laboratório de Mecânica de Solos e no Laboratório do Grupo de Geotecnia da Faculdade de Tecnologia da UFAM. Serão descritos: a metodologia empregada nos experimentos e os materiais utilizados. Para a concretização do programa experimental dessa dissertação será utilizada a seqüência descrita abaixo.

- Escolha dos materiais;
- Caracterização do solo;
- Caracterização da emulsão asfáltica;
- Dosagem da mistura solo-emulsão;
- Ensaio mecânicos.

4.1 ESCOLHA DOS MATERIAIS

Utilizou-se um solo proveniente da Base de Operações Geólogo Pedro de Moura da Petrobras, situada na região de Urucu e pertencente ao município de Coari. Como já abordado no Capítulo 3, a região apresenta uma carência de material granular e os solos superficiais apresentam predominância argilosa não propícia para a construção de pavimentos. A Figura 4.1 mostra o local na Estrada de SUC (Sul de Urucu).



Figura 4.1 – Jazida de Urucu

O material asfáltico empregado é uma emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta (RL-1C). Este foi adquirido na empresa EMAM - Emulsões e Transportes Ltda. Na especificação fornecida pela citada empresa, destaca-se a quantidade de água existente na emulsão com valor igual à de 39,84 % em relação ao peso total. A emulsão foi armazenada em recipientes, visando facilitar o manuseio durante a realização dos ensaios (Figura 4.2). O tempo máximo de estocagem foi de quatro meses.



Figura 4.2 – Recipiente com emulsão asfáltica

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

O solo coletado foi acondicionado em sacos de 40 kg e transportados de Urucu até Manaus por via fluvial. Em laboratório, as amostras secaram ao ar livre, sendo em seguida destorroados e peneirados. Inicialmente caracterizou-se o material conforme as prescrições da NBR 6457/1986, para em seguida serem submetido aos ensaios.

Determinou-se a massa específica dos grãos segundo o método de ensaio “Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa Específica” – NBR 6508/1984, da ABNT, onde foram realizados seis ensaios, sendo três com amostras sem secagem prévia.

As análises granulométricas por peneiramento e sedimentação (partículas menores que 0,074 mm) executaram-se de acordo com o método de ensaio “Solo – Análise Granulométrica” – NBR 7181/1984, da ABNT. O solo foi submetido a dez ensaios de sedimentação, sendo cinco com defloculante e cinco sem defloculante, seguindo as disposições da norma.

O limite de liquidez e plasticidade determinaram-se pelo método de ensaio NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984, da ABNT, respectivamente. Realizaram-se dez ensaios de LL, sendo cinco sem secagem prévia. Seguiu-se o mesmo procedimento para os ensaios de LP. Ambos os experimentos foram necessários para que o solo pudesse ser classificado de acordo com o índice de plasticidades.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA EMULSÃO ASFÁLTICA

Os ensaios de caracterização da emulsão asfáltica são relativamente simples e tem como finalidade controlar a qualidade da emulsão. Todos os resultados obtidos para a

emulsão em estudo foram averiguados junto à norma técnica que os regula (Tabela 4.1). Os principais experimentos utilizados neste trabalho foram:

- Viscosidade Saybold Furol – avalia as propriedades de consistência (velocidade de escoamento) das emulsões asfálticas;
- Sedimentação – verifica a tendência dos glóbulos de asfalto precipitarem durante a estocagem das emulsões asfálticas;
- Carga da partícula – trata-se de um ensaio de identificação de emulsões asfálticas catiônicas de ruptura rápida e média;
- Destilação – usa-se para determinar as proporções relativas de cimento asfáltico e água na emulsão asfáltica.

Ensaio de classificação	Norma técnica reguladora
Ensaio de viscosidade Saybolt-Furol	NBR 14491
Ensaio de sedimentação	NBR 6570
Ensaio de carga de partícula	NBR 6567
Ensaio de destilação	NBR 6568

Tabela 4.1 – Ensaio realizados na emulsão asfáltica

4.4 DOSAGEM DA MISTURA SOLO-EMULSÃO

Realizaram as misturas solo-emulsão adicionando-se emulsão asfáltica catiônica (RL-1C) ao solo natural, segundo os teores 1%, 2%, 5% e 8%, percentuais esses referentes à massa seca do solo. Para determinação das quantidades dos materiais (emulsão, água, solo) a serem empregados nesta mistura, foi necessário conhecer alguns parâmetros que a influenciam, principalmente, no que concerne aos teores de água envolvidos.

Segundo a revisão bibliográfica (Capítulo 2), além da umidade higroscópica do solo, a emulsão asfáltica contém uma quantidade de água. Outros teores diferentes de água contidos na mistura de solo-emulsão também são importantes, como:

- O teor de água de dispersão, uma parcela de água adicionada ao solo antes da aplicação da emulsão;
- O teor de água de diluição, considerou-se a proporção de 1:1, uma parte de emulsão para uma parte de água, segundo SOLIZ (2007);
- O teor de água de compactação refere-se à quantidade de água total a ser adicionada na massa de solo, ou seja, o teor necessário para alcançar a umidade ótima.

Para se calcular um traço de solo-emulsão em laboratório, inicialmente faz-se necessário que sejam obtidos os seguintes dados dos materiais:

- Umidade higroscópica do solo;
- Umidade ótima do solo natural;
- Quantidade de solo a ser trabalhada;
- Percentagem de CAP na emulsão;
- Percentagem de água na emulsão;
- Teor de emulsão a ser adicionado

Visando a dosagem da mistura solo-emulsão fez-se uma planilha norteando os cálculos de Miceli (2006) e Soliz (2007), usando a Microsoft Office Excel, para a determinação das quantidades dos elementos: solo, água e emulsão asfáltica.

Por meio dessa planilha, obteve-se: a) quantidade de emulsão a ser adicionada ao solo; b) água de diluição a ser adicionada a emulsão com finalidade de diminuir a viscosidade da mesma; c) água de dispersão a ser misturada ao solo antes da incorporação da emulsão asfáltica. Partindo dessas considerações calcula-se.

- Peso do solo seco P_s :

$$P_s = \frac{\text{Peso do solo umido}}{1 + \frac{\text{umidade higroscópica}}{100}}$$

- Quantidade de emulsão a ser colocada em função da percentagem escolhida:

$$Q.\text{emulsão} = \frac{\text{Porcentagem de emulsão}}{100} \cdot P_s$$

A quantidade de emulsão a ser acrescentada deverá ser diluída em quantidade igual de água, no caso de considerar-se a relação 1:1. Trata-se da água de diluição, que deve ser misturada antes da mistura ao solo. Tem-se então:

$$\text{Água de diluição} = Q.\text{emulsão}$$

Considerando-se que o fabricante especificou a porcentagem de água existente na emulsão asfáltica, tem-se:

$$\text{Água existente na emulsão} = \% \text{ água existente na emulsão} \times Q.\text{emulsão}$$

O cálculo da água de compactação equivalente ao total de água a ser adicionada na mistura será:

$$\text{Água de compactação} = Ps. \left(\frac{\text{Umidade Ótima} - \text{Umidade Higroscópica}}{100} \right)$$

Assim, tem-se que a água a ser adicionada ao solo, ou seja, a quantidade de água suficiente para que se atinja a umidade ótima será:

$$\text{Água de dispersão} = \text{Água de comp.} - (\text{Água de diluição} + \text{Água existente na emulsão})$$

A seqüência explicada anteriormente foi realizada para todos os teores da emulsão usados nas misturas com solo-emulsão. No caso do solo natural, simplesmente homogeneizou-se com adição direta da quantidade de água de compactação, necessária para que se atingisse o peso específico aparente seco máximo e umidade ótima.

De posse dos dados da dosagem da mistura, seguiram-se as etapas de acordo com as ilustrações da Figura 4.3:

- a) despeja-se a quantidade necessária de solo sobre uma bandeja, (etapa 1);
- b) pesa-se a quantidade de água de dispersão, (não ilustrado);
- c) pesa-se a quantidade necessária de emulsão asfáltica, (etapa 2);
- d) adiciona-se a água de diluição à emulsão asfáltica, (etapa 3);
- e) aplica-se a água de dispersão ao solo, (etapas 4 e 5);
- f) promove-se a mistura manual do solo + água de dispersão, (etapa 6);
- g) aplica-se a emulsão diluída ao solo, (etapas 7 e 8);
- h) procede-se uma homogeneização manual da mistura, (etapas 9, 10 e 11);

- i) submete-se esse material a uma peneira com abertura de 4,8 mm, a fim de se eliminar os grãos maiores formados pela ação da coesão solo + emulsão da mistura, (etapas 12, 13, 14 e 15);
- j) faz-se a última homogeneização da mistura, (não ilustrado);
- k) finalmente tem-se a mistura solo-emulsão pronta para ser submetida a ensaios mecânicos.



Figura 4.3 – Processo da mistura solo-emulsão

4.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Nesta fase, depois de concluído a mistura solo-emulsão (item 4.5.1), o material foi submetido, antes de ser compactado, a uma variação no tempo de exposição ao ar livre em intervalos estabelecidos, como: 0 hora designado neste estudo como “sem aeração” e 1 hora “com aeração”. Realizaram-se os seguintes ensaios: compactação, Índice de Suporte Califórnia, resistência à compressão simples e ensaio triaxial de cargas repetidas.

4.5.1 Ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia (ISC)

Os ensaios de compactação foram realizados para o solo natural e suas misturas segundo a energia do Proctor Intermediário e de acordo com as normas (NBR 7182/1986) da ABNT, em um compactador automático (Figura 4.4), onde foram determinados o peso específico aparente seco máximo e umidade ótima referente em todas as condições ensaiadas.



Figura 4.4 – Compactador Proctor automático

O Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *Califórnia Bearing Ratio* (CBR) seguiu as recomendações da NBR 9895/1987 e segundo a energia Intermediária. Confeccionaram-se os corpos-de-prova seguindo os parâmetros de compactação para as amostras com aeração. Neste estudo pretendeu-se, além das determinações rotineiras desses ensaios, verificar o comportamento da mistura solo-emulsão com e sem imersão em água. Empregou-se um equipamento computadorizado como mostrado na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Equipamento para determinação do Índice de Suporte Califórnia

4.5.2 Resistência à compressão simples (RCS)

Até o momento não existe uma norma específica para a determinação da resistência à compressão simples de misturas solo-emulsão, de modo que, os experimentos concernentes a este parâmetro foram executados com os corpos-de-prova dos ensaios triaxiais de cargas repetidas (Módulo de Resiliência), os quais foram rompidos com a velocidade de 0,4 mm/min.

As amostras foram moldadas em cilindros com altura de 20 cm e 10 cm de diâmetro, obedecendo à relação altura-diâmetro de 2:1. Em função dos parâmetros de compactação, o solo natural e suas misturas foram submetidos a processos controlados, tais como, o número

de golpes e a altura das cinco camadas, visando assegurar o grau de compactação acima de 98%. Cumpri ressaltar que nesta etapa as amostras foram expostas ao tempo de aeração (0 e 1 hora) e moldadas com base nos parâmetros de compactação para cada teor solo-emulsão com e sem aeração determinados.

A Figura 4.6 mostra os corpos-de-prova ao ar livre, no qual, confeccionaram-se oito para cada teor, 0% (solo natural), 1%, 2%, 5% e 8% de emulsão asfáltica, sendo quatro deles rompidos após a compactação (sem cura) e os outros após um período de 7 dias de cura.



Figura 4.6 – Corpos-de-prova expostos ao ar livre

O método de cura escolhido para a avaliação da estabilização betuminosa desta pesquisa consistiu em expor o corpo-de-prova, sem selar, ao ar livre. Segundo Sant'Ana *et al.* (2007), parte da água contida na mistura deve evaporar para dar início ao processo de ruptura, ou melhor, a floculação da emulsão. Segundo Miceli (2006), a cura úmida não contribui para o comportamento mecânico da mistura. Todavia, estudos realizados por Arancibia (2008), mostram uma melhoria no comportamento das misturas solo-emulsão com cura úmida. No entanto, sabe-se que a perda de umidade é uma das grandes responsáveis pela ruptura da emulsão asfáltica e, por conseguinte, o aumento da coesão e impermeabilidade. Motivo esse

que respalda o método de cura empregado neste estudo para os corpos-de-prova com solo natural e suas misturas solo-emulsão. Os procedimentos de moldagem dos corpos-de-prova seguiram a seqüência apresentada na Figura 4.7.



Figura 4.7 – Procedimento de moldagem para determinação da RCS

4.5.3 Ensaio triaxial de cargas repetidas

Os procedimentos experimentais concernentes ao ensaio triaxial, utilizaram a normalização da AASHTO para solos a serem empregados como base e sub-base (AASHTO T 307-99). Este método mostra-se mais eficaz que o brasileiro, tendo em vista que representa de forma mais aproximada às condições de carregamento em campo (FROTA *at al.*, 2006).

Todos os ensaios triaxiais dinâmicos realizaram-se no Laboratório do Grupo de Geotecnia, em uma UTM 14 (*Universal Test Machine*) mostrado nas Figuras 4.8 e 4.9, tendo sido empregado corpos-de-prova confeccionados nas mesmas condições especificadas no ensaio de resistência à compressão simples em termos de: quantidade, tempo de aeração, cura

e dimensões. O material foi envolto em membrana de látex e posicionado no interior da célula de confinamento triaxial, conforme mostra a Figura 4.10.



Figura 4.8 – Equipamento do ensaio triaxial dinâmico (Grupo GEOTEC)

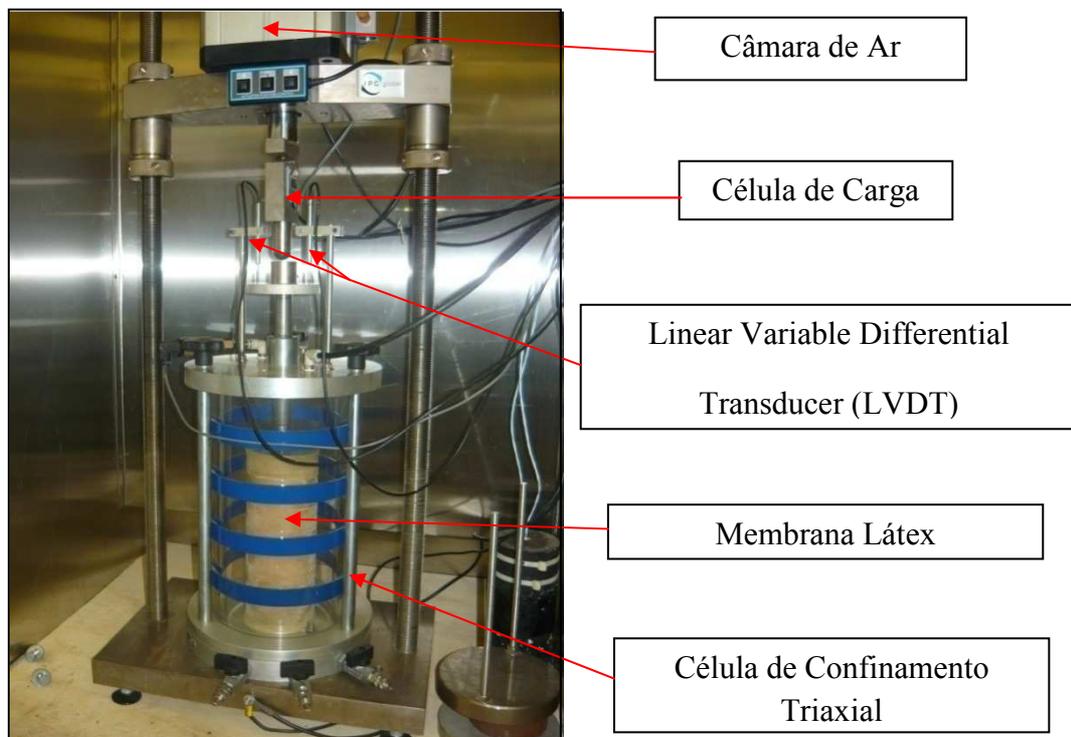


Figura 4.9 – Célula de confinamento triaxial (Grupo GEOTEC)

As deformações dos corpos-de-prova foram medidas segundo a média aritmética dos deslocamentos registrados por meio de dois dispositivos tipo LVDT, posicionados no topo do pistão da célula triaxial, diametralmente opostos. A Figura 4.9 apresenta parte do equipamento de MR onde são especificados os principais dispositivos, por meio do qual, as amostras foram submetidas à pares de tensões com cargas repetidas, ao serem colocados em uma célula de confinamento.



Figura 4.10 – Procedimento para determinação do MR

Aplicou-se a tensão desvio por meio de um pistão e a suas medidas realizaram-se por meio de célula de carga solidária ao dispositivo. A tensão confinante, por outro lado, foi aplicada por meio de sistema de aquisição de ar posicionado na parte superior da célula triaxial e mantida constante ao longo da aplicação da tensão desvio. As medições são

determinadas por meio de uma célula de carga específica, também posicionada nesta região do dispositivo confinante.

O corpo-de-prova era, então, submetido a ciclos de carregamento e confinantes distintos, sendo a seqüência inicial destinada ao condicionamento da amostra. A Tabela 4.2 mostra os valores de tensão desvio e tensão confinante aplicadas, bem como a quantidade de ciclos que compõem cada seqüência. A seqüência 0 (zero) não é considerada como resultado, uma vez que destina-se unicamente ao condicionamento dos corpos-de-prova.

Seqüência	Tensões Aplicadas (kPa)		Quantidade de Ciclos por Seqüência
	Desvio	Confinante	
0	103,0	103,0	1000
1	21,0		
2	41,0	21,0	
3	62,0		
4	34,0		
5	69,0	34,0	
6	103,0		
7	69,0		
8	138,0	69,0	100
9	207,0		
10	69,0		
11	103,0	103,0	
12	207,0		
13	103,0		
14	138,0	138,0	
15	276,0		

Tabela 4.2 – Valores de tensão desvio, tensão confinante e quantidade de ciclos por seqüência durante ensaio de determinação do módulo de resiliência

FONTE: AASHTO T 307-99

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos experimentos referentes:

- Caracterização do solo procedente da região de Urucu, no município de Coari – AM, por meio da granulometria, limites de consistência, massa específica dos sólidos e classificação geotécnica (TRB e SUCS);
- Caracterização da emulsão asfáltica catiônica, que será utilizada nas misturas solo-emulsão;
- Ensaios mecânicos: compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC), resistência à compressão simples (RCS) e triaxial de cargas repetidas.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A caracterização, em geral, tem por objetivo avaliar geotecnicamente o tipo de solo com respeito a sua textura e consistência, e particularmente neste estudo, tendo em vista tais resultados influenciarem no desempenho da mistura solo-emulsão.

Realizaram-se os seguintes ensaios: granulometria, massa específica dos sólidos, limites de liquidez e de plasticidade, de acordo com as especificações da Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT). Cada experimento foi executado, pelo menos, cinco vezes visando precisão dos resultados.

5.1.1 Granulometria

Na Tabela 5.1 e Figura 5.1 encontram-se os resultados da análise granulométrica realizada com e sem defloculante, com o intuito de avaliar o teor de agregação presentes no solo. Com base nesses resultados expostos, nota-se que o solo apresenta uma grande predominância da fração silte, sendo esta superior ao dobro da segunda fração em predomínio (areia). Quanto à textura, o solo se classificou como silte areno argiloso (com defloculante) e silte arenoso (sem defloculante).

Frações de Solo	Com defloculante (%)	Sem defloculante (%)
Pedregulho	-	-
Areia	25,7	31,8
Silte	57,4	62,9
Argila	16,9	5,3
Total	100	100

Tabela 5.1 – Distribuição granulométrica do solo

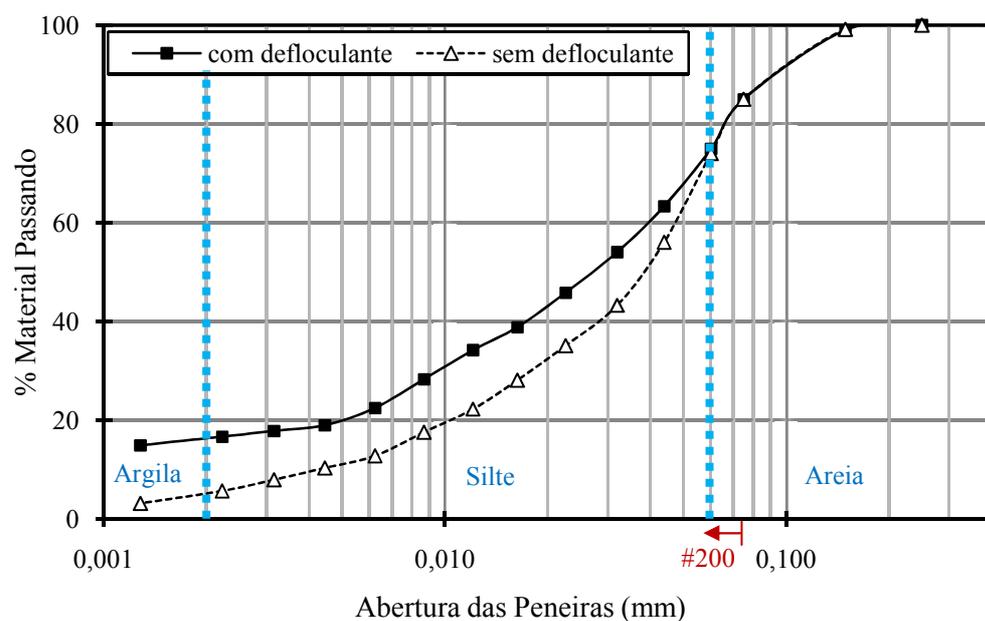


Figura 5.1 – Curva granulométrica do solo

No que se refere aos resultados granulométricos com e sem defloculante, também, é possível verificar o teor de agregação e o grau de alteração ou relação silte/argila. Segundo Costa (1973, *apud* PESSOA, 2004), esta relação é um bom indicativo do grau de intemperismo dos materiais: grau de alteração maior ou igual a 15, define solos pouco evoluídos, enquanto que valores menores que 15 caracterizam solos antigos e intemperizados. A Tabela 5.2 mostra os resultados do teor de agregação e o grau de alteração calculados por meio das Equações 5.1, 5.2 e 5.3.

$$\text{Agregados Totais (\%)} = \% \text{ argila com defloculante} - \% \text{ argila sem defloculante} \quad (5.1)$$

$$\text{Teor de Agregados (\%)} = 100 \times [\text{Agregados Totais (\%)} / \% \text{ argila com defloculante}] \quad (5.2)$$

$$\text{Grau de Alteração} = \% \text{ silte} / \% \text{ argila} \quad (5.3)$$

Teor de Agregados (T.A.)	Grau de Alteração (G.A.)
71%	3

Tabela 5.2 – Teor de agregados e grau de alteração

Verifica-se pela Tabela 5.2, que: a) o teor de agregação apresentou um valor consideravelmente elevado, indicando que grande parte da fração argila encontra-se agregada às partículas de silte. Resultados estes coerentes com os encontrados por Pessoa (2004); b) o grau de alteração indicou um solo antigo, corroborando com os resultados de Lima (1999).

5.1.2 Limites de consistência e Massa específica dos grãos

Seguindo-se as especificações da NBR 6508/84, NBR 6459/84 e NBR 7180/84, determinaram-se, respectivamente, a massa específica dos grãos (ρ_g), o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP), juntamente com o cálculo do índice de plasticidade (IP).

Para tais ensaios, o solo foi submetido à secagem ao ar livre como é especificado na norma. No entanto, com o intento de mostrar a influência da secagem prévia na variação dos limites de consistência, as amostras, também, foram ensaiadas em situação de umidade higroscópica natural de campo (cerca de 13% “*in situ*”). Os resultados desses ensaios se encontram na Tabela 5.3.

Ensaio	Com secagem prévia	Sem secagem prévia
LL (%)	19	17
LP (%)	13	11
IP (%)	6	6
ρ_g (g/cm ³)	2,61	2,61

Tabela 5.3 – Limites de Atterberg e Massa específica dos grãos

Analisando-se a Tabela 5.3, nota-se que: não ocorreram diferenças significantes nos resultados dos limites de consistência, comparando-se com e sem secagem prévia, valores iguais relativos ao IP e a massa específica dos grãos e, em particular, o solo mostrou baixa plasticidade em ambas as condições estudadas, contradizendo as afirmações de Silva (2003). Segundo este autor, solos lateríticos diminuem sua plasticidade quando secos previamente ao ar livre.

A Tabela 5.4 apresenta a classificação geotécnica – TRB e SUCS do solo analisado neste estudo. Apesar das limitações a que estão sujeitas os dois sistemas de classificação para solos tropicais, os mesmos indicaram resultados coerentes quando confrontados com a granulometria e a plasticidade, ou seja, ambos os solos mostraram predominância siltosa e baixa plasticidade.

Índices		Porcentagem passante				Classificação	
LL (%)	IP (%)	#4	#10	#40	#200	TRB	SUCS
19	6	100	100	100	85	A - 4	ML

Tabela 5.4 – Classificação geotécnica

De acordo com a revisão bibliografia abordada no Capítulo 2, recomendações são feitas a um solo, quanto à granulometria e índice de plasticidade, para o seu emprego em estabilizações com materiais betuminosos. A Tabela 5.5 mostra os dados relativos ao solo em estudo, juntamente com os limites granulométricos preconizados por alguns autores.

Peneira	Solo em estudo	Yoder e Witczak (1975)			ABEDA (2001)	ASTM (2006)	DER-SP (1991)
		Areias	Pedregulhos	Finos			
25 mm	100	-	-	-	-	-	80 a 100
4,8 mm	100	-	-	-	-	-	50 a 100
2,0 mm	100	-	-	-	-	-	35 a 100
0,42 mm	100	-	-	-	-	-	15 a 75
0,075 mm	85	<25	<15	<35	<20	<25	0 a 35
IP(%)máx	6	12	12	18	8	-	6

Tabela 5.5 – Condição para estabilização solo-emulsão

FONTE: Gondim, 2008

Com base nas recomendações da Tabela 5.5, observa-se que o solo de Urucu não obedece aos requisitos granulométricos segundo todos os autores. A explicação reside no fato desse solo possuir quantidade da fração fina fora dos limites aceitáveis, ou seja, as porcentagens granulométricas passantes, em especial na peneira nº 200, ficaram muito acima dos limites propostos. Valores estes que chegam a ultrapassar o dobro ou até mesmo o triplo do limite estabelecido, dependendo do órgão e/ou autores. No entanto, trabalhos recentes (Tabela 5.6) demonstram bons resultados com solos que não se enquadram nos limites

recomendados. Nessa Tabela tem-se resultados de caracterizações oriundos de dissertações para fins rodoviários. Nota-se, ainda, que os autores se depararam com dificuldade em satisfazer o percentual passante nas peneiras #40 e #200. Todavia, encontraram resultados satisfatórios quanto ao desempenho mecânico das misturas estabilizadas com emulsão asfáltica.

Trabalhos com Solo-emulsão	Solo	Percentagem que passa (%)				LL (%)	LP (%)	Classificação TRB
		#4	#10	#40	#200			
MICELI (2006)	A	98	95	81	30	NP	NP	A-2-4
	B	100	97	64	41	52	15	A-7-5
	C	97	91	62	41	43	19	A-7-6
SOLIZ (2007)	1	87	72	47	17	NP	NP	A-1-b
	2	100	98	73	61	46	29	A-7-5
	3	99	97	75	28	NP	NP	A-2-4
GONDIM (2008)	A	100	100	83	14	NP	NP	A-2-4
	B	100	97	87	44	22	7	A-4
	C	100	72	49	35	30	4	A-2-4
Solo em estudo		100	100	100	85	19	6	A-4

Tabela 5.6 – Estudos solo-emulsão

5.2 CARACTERIZAÇÃO DA EMULSÃO ASFÁLTICA

Ao ser adquirida a emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta (RL-1C), para uso nesta pesquisa, a empresa forneceu as informações presentes na Tabela 5.7, onde se observa que o resíduo da destilação – quantidade de água presente na emulsão, possui um valor igual a 39,84% em peso. Tal valor constitui-se de uma suma importância no cálculo da dosagem solo-emulsão.

Ensaio	Resultados	Especificação
Viscosidade Saybolt-Furol a 50 °C	16,22	Máx. 70
Peneiração (retido na peneira 0,84 mm), % em peso	0,0	Máx. 0,1
Carga da partícula	Positiva	Positiva
Resíduo da destilação, % em peso sobre o total	60,16	Mín. 60

Tabela 5.7 – Caracterização da emulsão RL-1C

5.3 COMPACTAÇÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

5.3.1 Ensaio de compactação

Neste experimento, incluindo o solo natural, submetem-se os corpos-de-prova a duas condições de aeração: 0 hora (“sem aeração”) e 1 hora (“com aeração”), permitindo-se, desta forma, avaliar a influência da ruptura da emulsão. Obteve-se o teor de umidade de cada ponto da curva de compactação, mantendo o teor de emulsão (1%, 2%, 5% ou 8%), enquanto variou-se a adição de água, objetivando-se determinar os parâmetros de compactação concernente a cada teor de emulsão, como também, averiguar eventuais modificações influenciadas pela aeração. Os aludidos teores 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 o processo da mistura, em laboratório, observou-se visualmente que ocorreram rupturas prematuras da emulsão com a coalescência das partículas do betume, formando aglomerados betuminosos de diversos tamanhos espalhados pela massa de solo. Segundo Gondim (2008), o recobrimento de todos os grãos de maneira uniforme é inexequível para solos finos. A Tabela 5.8 e Figura 5.2 mostram o comportamento das curvas

de compactação com as médias dos valores de umidade ótima ($w_{ót}$) e peso específico aparente seco (PEAS).

Teor de Emulsão (%)	Sem aeração		Com aeração	
	PEAS (kN/m^3)	$w_{ót}$ (%)	PEAS (kN/m^3)	$w_{ót}$ (%)
0	19,6	10,4	19,6	10,4
1	19,2	10,8	19,3	10,8
2	19,1	10,4	19,3	10,5
5	18,9	10,3	19,0	10,0
8	18,7	9,8	18,5	9,8

Tabela 5.8 – Pesos específicos aparentes secos e umidades ótimas

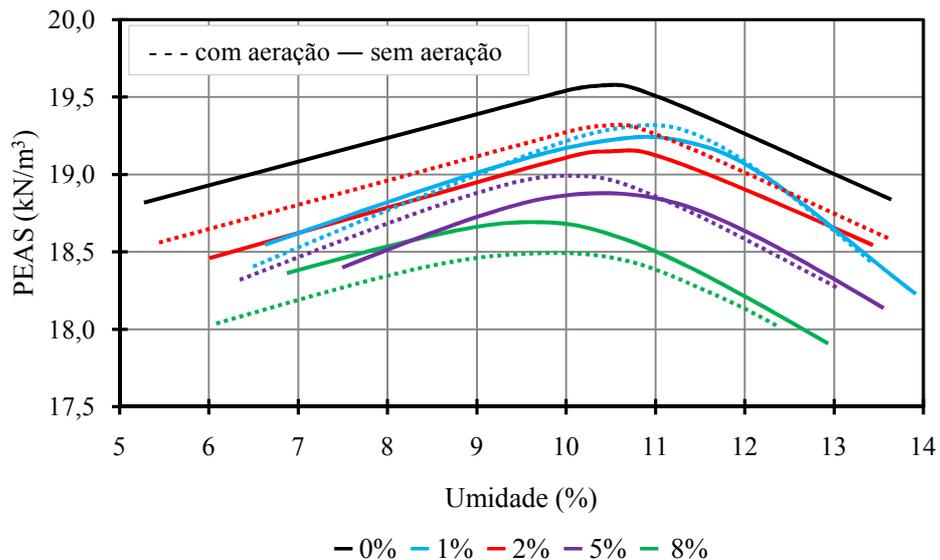


Figura 5.2 – Curva de compactação: solo natural e misturas com e sem aeração

Observando-se o comportamento dessas curvas, constatou-se que: a) a adição de teores de emulsão não alterou significativamente os valores do peso específico aparente do solo e da umidade ótima; b) o tempo de aeração não influenciou nos parâmetros de compactação do solo natural, porém, ocorrem modificações significativas nas interações solo-emulsão, advindo da ruptura da emulsão.

Nota-se, igualmente, que as curvas de compactação das misturas não apresentaram alterações na forma, indicando, assim, que a emulsão não ocasiona modificações na estrutura do solo, conclusão antagônica a que chegaram Jacintho (2005) e Gondim (2008).

Com relação ao tempo de aeração, as amostras solo-emulsão mostraram um comportamento condizente com as afirmações de Jacintho (2005). Este autor realizou ensaios de compactação, considerando os tempos de aeração de 0h, 2h, 3h e 4 horas, tendo não observado alteração significativa nos valores do peso específico aparente, porém encontrou redução da umidade.

Tratando-se especificamente dos parâmetros de compactação, confrontaram-se os dados desse estudo com os resultados de Gondim (2008), conforme é mostrado nas Figuras 5.3 e 5.4, onde se conclui que: a) o comportamento dos pesos específicos das misturas solo-emulsão, mostrou-se, em geral, semelhante, ou seja, o aumento de teores ocasionou em reduções do PEAS; b) a umidade ótima, em geral, diminuiu com o aumento dos teores de emulsão, no entanto, tem-se umidade ótima acima do solo natural, comportamento visto em ambos os estudos.

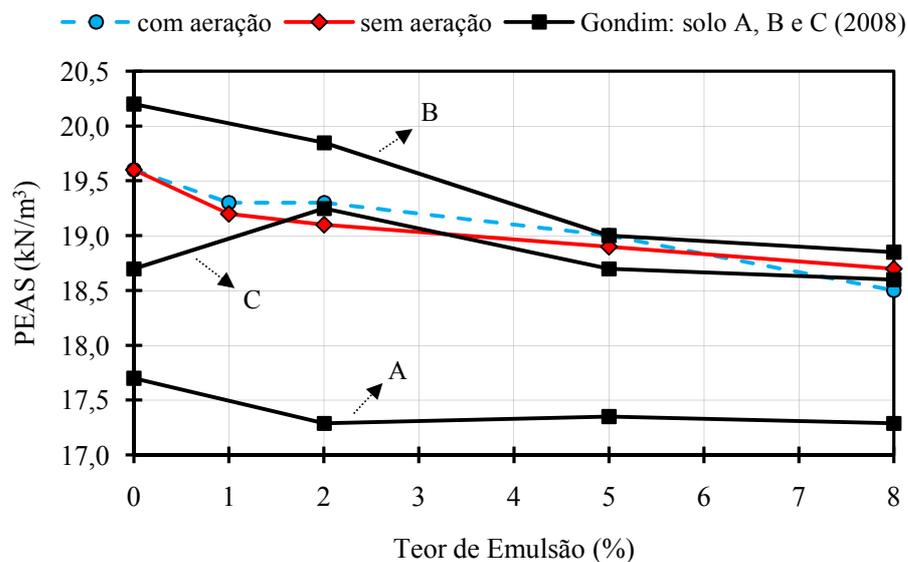


Figura 5.3 – Teor de emulsão x média do peso específico aparente seco máximo

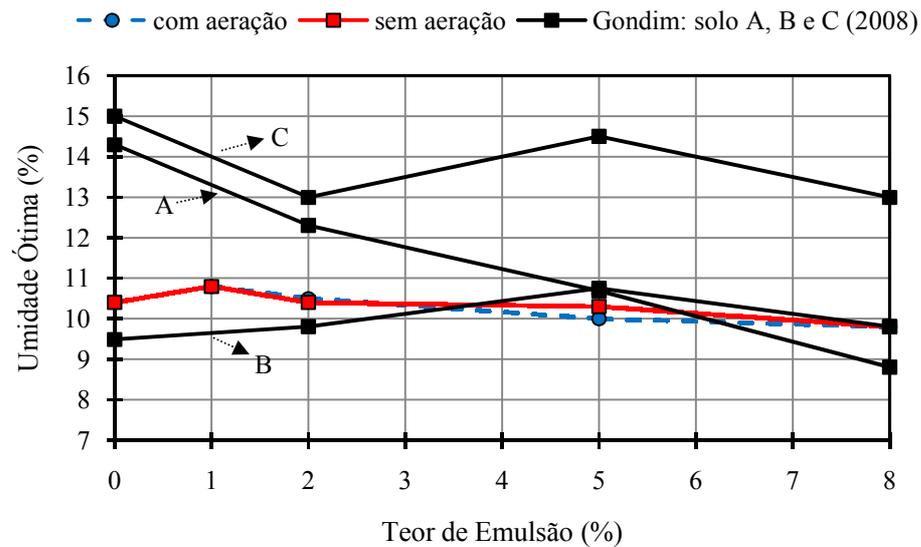


Figura 5.4 – Teor de emulsão x umidade ótima

Mediante as Figuras 5.3 e 5.4, observa-se que, para o solo em estudo, à medida que se adiciona emulsão asfáltica ocorre uma redução no valor do peso específico aparente seco máximo do material, além de uma leve variação na umidade ótima, mostrando valores bastante próximos da umidade ótima do solo natural. Pode-se concluir que o material betuminoso praticamente não alterou a umidade ótima do solo pesquisado.

Cumprе salientar que esses resultados mostram consenso com as conclusões de alguns autores: o peso específico máximo das misturas de solo-emulsão diminui com o aumento do teor de emulsão e a umidade das misturas solo-emulsão varia menos de 1% com relação à umidade ótima do solo natural (ARAÚJO *et al.*, 1983; JACINTHO, 2005). Por outro lado o acréscimo do peso específico acima do solo natural, com adição de emulsão, foi observado por Jacintho (2005) e Gondim (2008). ¹ Momm (1983) e ² Lucena *et al.* (1982) consideraram esse resultado como o padrão de comportamento para a maioria das misturas solo-emulsão.

¹ MOMM, L. (1983) Uso de Emulsão Catiônica na Estabilização de Solos. Anais da 18ª Reunião Anual de Pavimentação. Porto Alegre, RS.

² 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.

5.3.2 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

Neste experimento as amostras foram moldadas de acordo com as rotineiras padronizações (no caso, ABNT NBR 9895/87), submetidas ao tempo de aeração de 1h e segundo os teores de 0%, 2%, 5% e 8%. Pelo fato deste ensaio utilizar como material referencia à brita graduada e não misturas estabilizadas quimicamente e, exigir uma grande quantidade de solo, não foram realizados ensaios sem aeração. O ensaio em pauta foi dividido seguindo duas condições:

- a) Com imersão – inicialmente os corpos-de-prova foram submetidos à cura durante um período de 0 e 7 dias, antes de serem imersos em água para verificação do comportamento da mistura solo-emulsão inundada, sendo posteriormente realizado o ensaio de penetração;
- b) Sem imersão – com exceção a imersão em água, os corpos-de-prova foram submetidos ao mesmo procedimento descrito anteriormente.

A Figura 5.5 apresenta os resultados de ISC para o solo natural e para as misturas solo-emulsão com imersão. Verificou-se que: a) o solo natural apresentou condições para o seu emprego em camada de sub-base segundo a especificação do Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT), onde o ISC deve ser superior a 20% e expansão menor que 1%; b) a adição de emulsão causou uma diminuição do Índice de Suporte Califórnia, mesmo com um período de cura, tendo as misturas de solo-emulsão alcançado valores de ISC inferiores aquele relativo à sem cura, exceção para o teor de 8%.

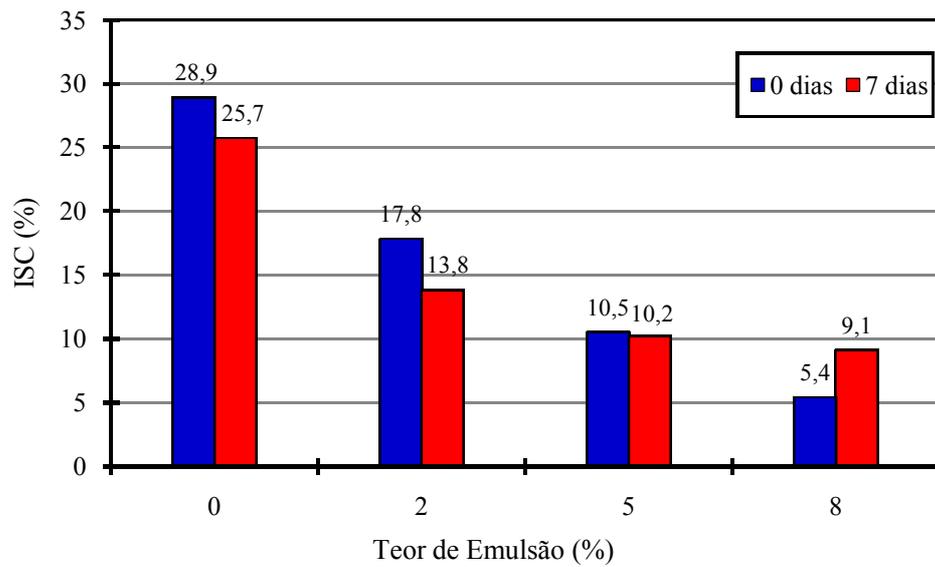


Figura 5.5 – Resultados do ISC após imersão em água, com aeração

A Figura 5.6 mostra os resultados da expansão do solo natural e das misturas solo-emulsão, onde se verifica que as misturas solo-emulsão (5% sem cura e 8% com cura) obtiveram valores superiores relativos ao solo natural. Essa tendência foi identificada nos estudos de Jacintho (2005). A Figura 5.7 indica os resultados de ISC para os corpos-de-prova não imersos em água.

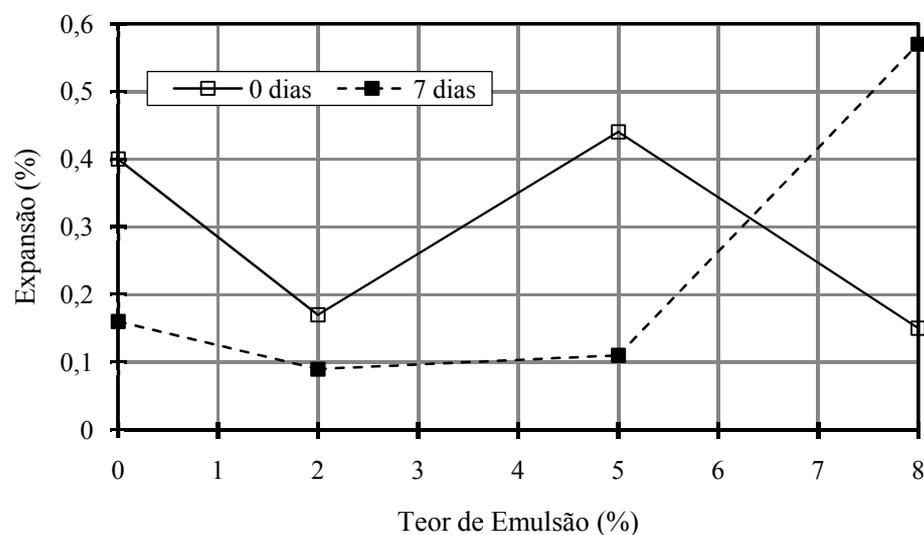


Figura 5.6 – Expansão x teor de emulsão após imersão

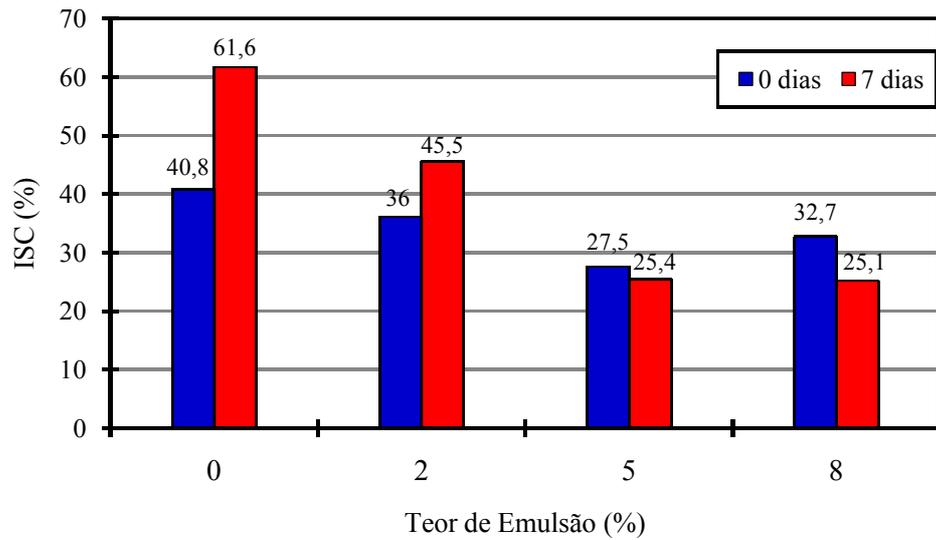


Figura 5.7 – Resultados dos ensaios de ISC sem imersão em água, com aeração

Observa-se que, mais uma vez, a adição de emulsão asfáltica não resultou em acréscimos nos valores desse parâmetro. Ao confrontar os resultados do ISC referentes às condições com e sem imersão (Figura 5.8) verifica-se que, apesar do decréscimo nos valores, a cura e a imersão não influenciaram no comportamento mecânico da mistura com 5% de RL-1C.

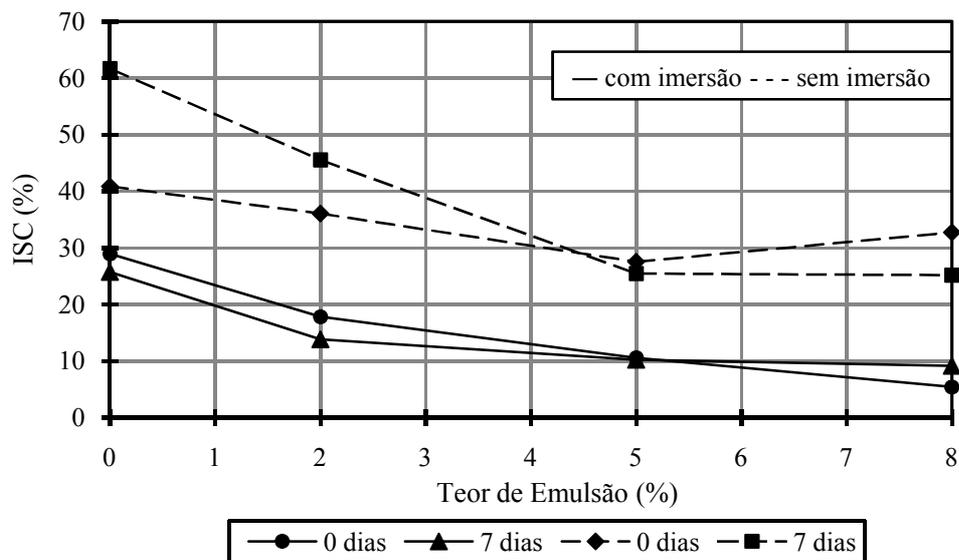


Figura 5.8 – Comparação dos resultados dos ensaios de ISC em água, com e sem imersão

Mediante os resultados apresentados na Figura 5.8, verifica-se, ainda, que a emulsão asfáltica não foi capaz de propiciar acréscimos do ISC, mesmo em condições não inundado. Sobre tais afirmações, têm-se os estudos realizados por pesquisadores – SANTANA (1976), JACINTHO (2005) e GONDIM (2008), que chegaram a distintas respostas, tendo-se em alguns trabalhos que a emulsão acresceu o valor do ISC e, em outros o efeito mostrou-se o oposto. Para este último caso, não implica que a estabilização betuminosa seja desaconselhável, visto que, segundo Medina e Motta (2004), o citado experimento é que não se adéqua para verificação do comportamento de misturas estabilizadas quimicamente.

5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

5.4.1 Moldagem dos corpos-de-prova

Realizou-se a moldagem dos corpos-de-prova visando o ensaio de resistência à compressão simples (RCS) baseado nos parâmetros de compactação, encontrados para o solo natural e para cada teor solo-emulsão, bem como, na variação do tempo de aeração (0h e 1 hora) antes de compactação das amostras.

Nesta pesquisa confeccionaram-se os corpos-de-prova mantendo-se uma relação 2:1, conforme é comumente empregado nesse tipo de experimento (ABNT NBR-12770), com a altura sendo o dobro do diâmetro, e que segundo Miceli (2006) possibilitaria a ruptura do material por cisalhamento durante o ensaio de resistência à compressão simples.

Optou-se por moldar, no mínimo, oito corpos-de-prova para o solo natural e para as misturas solo-emulsão, estas variando os teores de 1%, 2%, 5% e 8% de emulsão asfáltica (RL-1C), sendo quatro rompidos após a moldagem e quatro após um período de sete dias de cura expostos à temperatura ambiente.

5.4.2 Resultados dos ensaios

A Figura 5.10 apresenta o padrão de ruptura observado neste estudo, com o plano de ruptura indicando uma inclinação de 45 graus. As Figuras 5.11 a 5.13 mostram os resultados para os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) relativos ao solo natural e as misturas solo-emulsão, com e sem aeração e variando a porcentagem da emulsão RL-1C em 1%, 2%, 5% e 8%.



Figura 5.10 – Padrão de ruptura após o ensaio de RCS

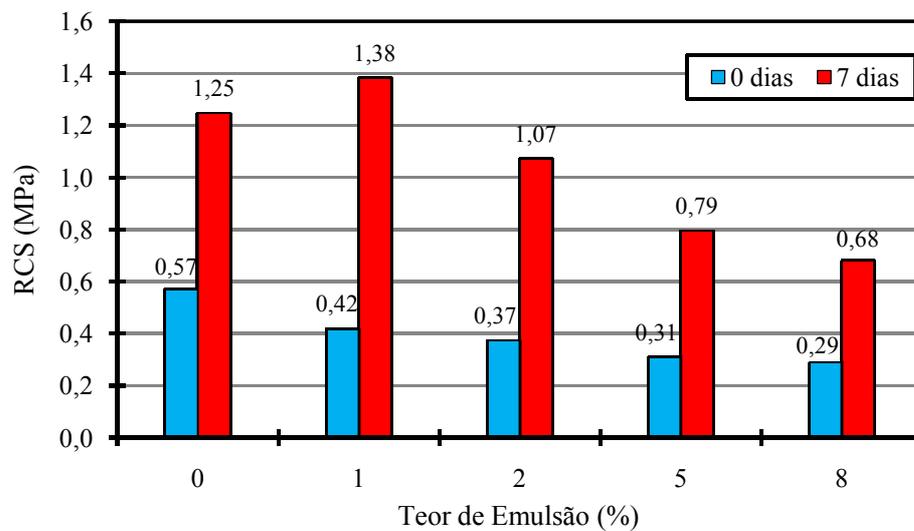


Figura 5.11 – RCS em função do tempo de cura, com aeração

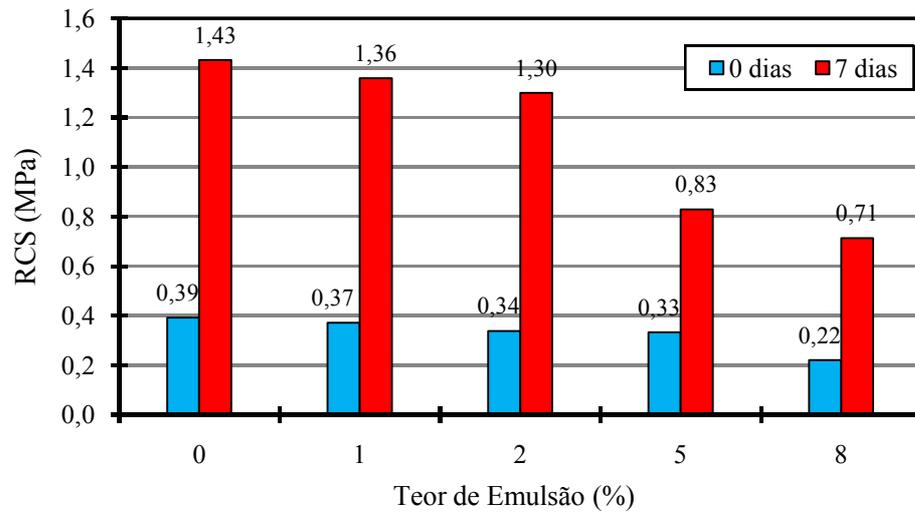


Figura 5.12 – RCS em função do tempo de cura, sem aeração

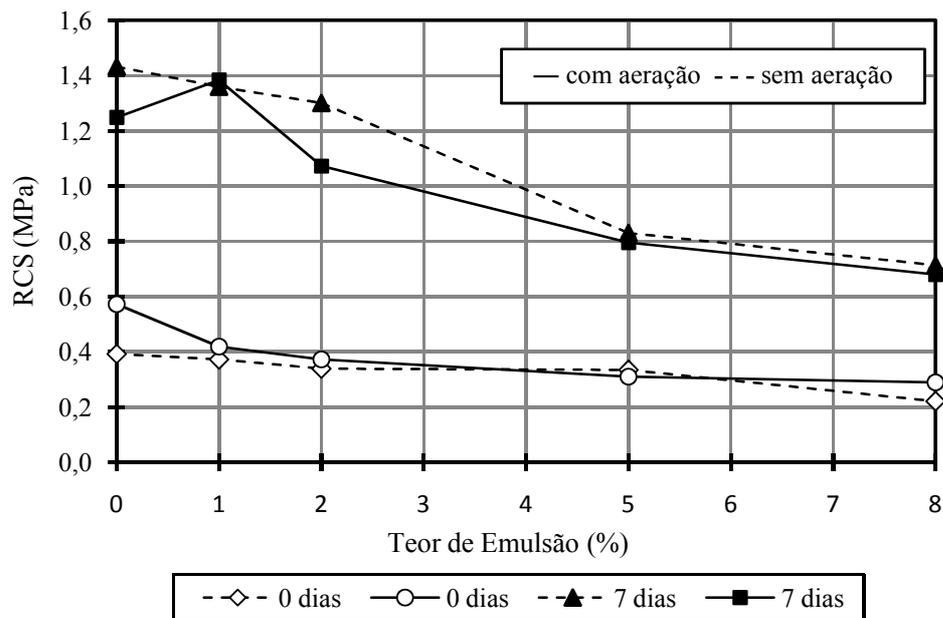


Figura 5.13 – RCS em função do teor de emulsão e tempo de cura

Analisando-se as Figuras 5.11 e 5.12, verifica-se que as amostras solo-emulsão, em geral, apresentaram uma baixa resistência a compressão relativa ao solo natural e, que o acréscimo de teores de emulsão diminui ainda mais os valores de RCS. Particularmente, segundo a Figura 5.13 e no que se refere ao período de cura, essas reduções foram mais acentuadas, comparado aos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de imediato.

As Figuras 5.14 e 5.15 abordam as deformações dos corpos-de-prova ocorridas durante o ensaio da resistência à compressão simples, alusivas as amostras com e sem aeração. Notou-se, que: a) os corpos-de-prova ensaiados para 0 dias mostraram as maiores deformações; b) o acréscimo dos teores da emulsão, em geral, diminuíram as deformações do material; c) as deformações das amostras com aeração foram significativamente inferiores às aquelas sem aeração, atribuindo-se este fato a perda de umidade do material ao ser exposto ao tempo de aeração. Tais resultados indicaram a importância da análise da deformação.

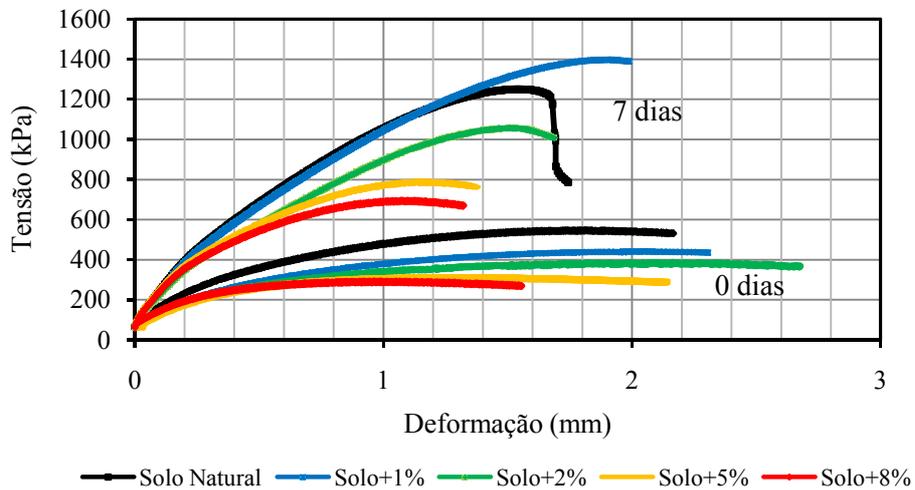


Figura 5.14 – Deformação dos corpos-de-prova com aeração

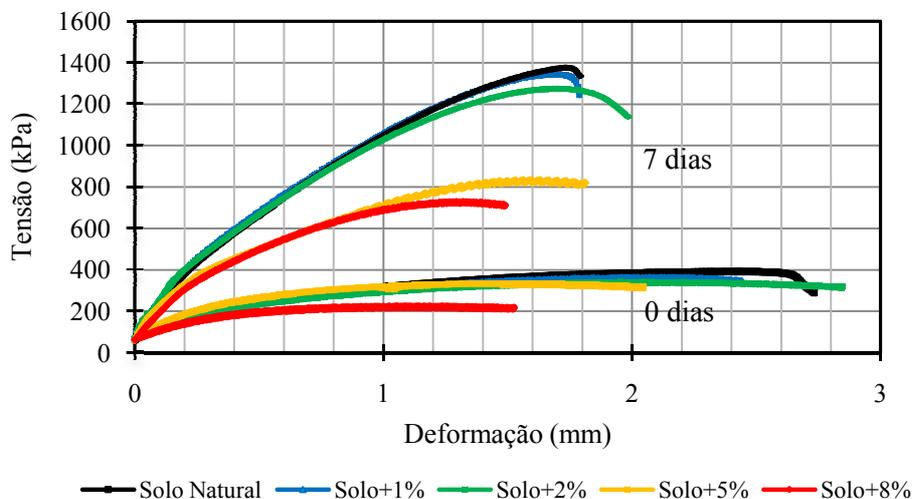


Figura 5.15 – Deformação dos corpos-de-prova sem aeração

Na Figura 5.16 analisou-se o efeito da emulsão na contribuição do ganho em resistência, após um período de 7 dias, por meio da avaliação individual de cada teor, fixando os resultados nos ensaios imediatos (0 dias) como 100%. Desta forma, observou-se a real contribuição da emulsão asfáltica no comportamento mecânico das misturas, dado pela RCS.

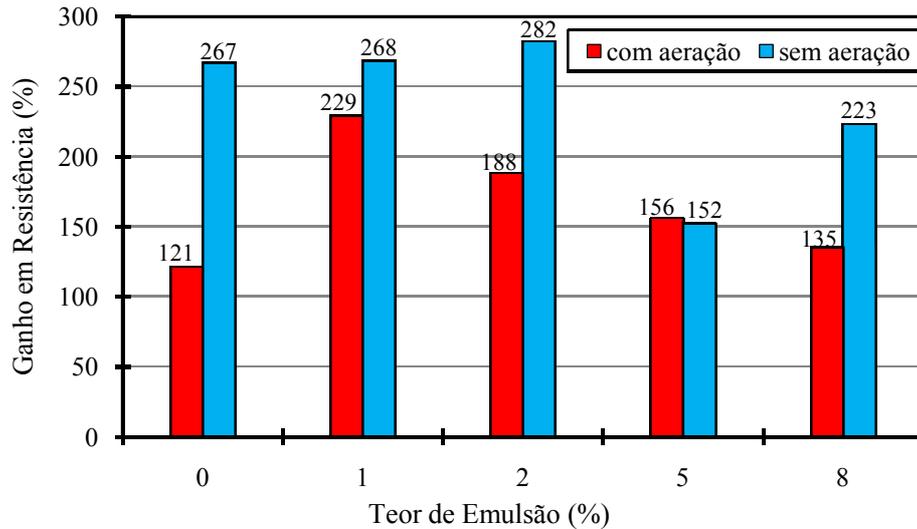


Figura 5.16 – Ganho em resistência pelo efeito da cura após 7 dias

Segundo a Figura 5.16 verifica-se que: a) os corpos-de-prova obtiveram um ganho de resistência acima de 100%, decorrente principalmente da perda de umidade do material; b) o solo natural sem aeração apresentou um aumento de resistência em torno do dobro relativo às condições mostradas com aeração. No entanto, este ganho é menos acentuado para as misturas solo-emulsão asfáltica; c) nas amostras com aeração à medida que se reduziu o teor de emulsão, ocorreram resultados significativos de acordo com o período de cura. Contudo, ressalta-se que estes valores se mostraram superiores ao solo natural, em termos de resistência absoluta apenas para o teor 1%; d) nas amostras sem aeração os teores de emulsão não ocasionaram em resistência superior ao solo natural; e) tratando-se do tempo de aeração, observou-se que o ganho de resistência foi ocasionado pela perda de umidade. Visando

analisar a influência da umidade no presente estudo, apresentam-se a seguir as Figuras 5.17 e 5.18.

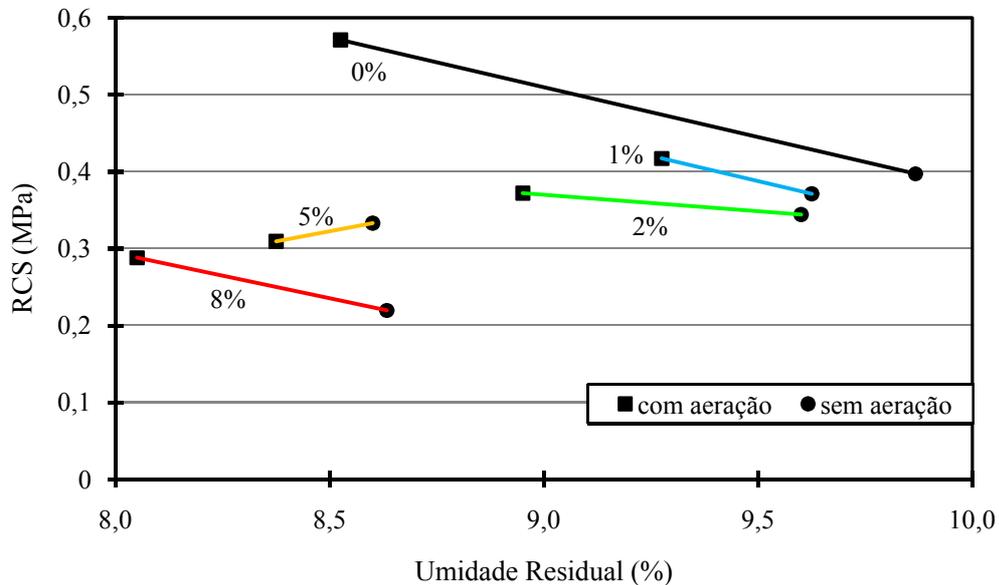


Figura 5.17 – RCS em função da umidade para amostras sem cura

A Figura 5.17 mostra valores da resistência em função das umidades residuais, onde, nota-se que a resistência do material depende diretamente da sua umidade, o que reforça, em geral, as conclusões de Jacintho (2005). De acordo com este autor, a variação da umidade de um material, exerceria influência considerável na resistência, ou seja, à medida que se aumentava a umidade das amostras, diminuía-se as suas resistências à compressão. Observa-se, também, que as amostras com aeração apresentaram valores mais baixos de umidade relativos àquelas sem aeração, refletindo o tempo de exposição ao ar livre antes da moldagem. Comportamento discordante apenas relativo amostra com 5% de emulsão.

Na Figura 5.18 as amostras submetidas à cura de sete dias evidenciam um comportamento inverso ao indicado pela Figura 5.17, ou seja, ocorreram maiores resistências à compressão para amostras com maiores teores de umidade. Nota-se, também, que para algumas amostras ocorreram variações de resistência na proporção de 0,1 MPa para uma taxa

de 1% de umidade, tanto para os ensaios sem e com cura. Nos experimentos de Jacintho (2005), a maior variação de RCS foi de 0,05 MPa para a mesma taxa de umidade.

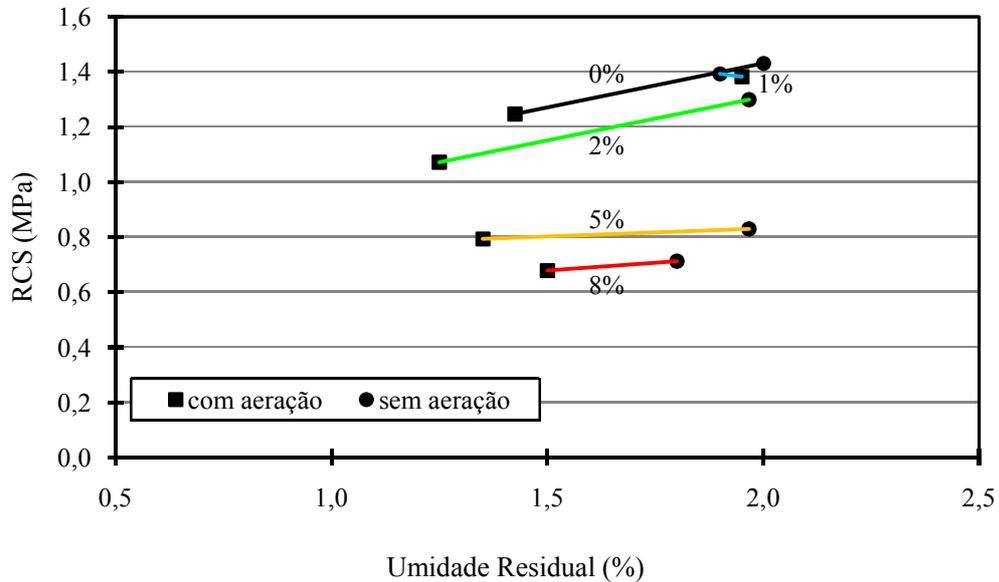


Figura 5.18 – RCS em função da umidade para amostras após cura

Pesquisas realizadas (GONDIM, 2008; SOLIZ, 2007; MICELI, 2006 e JACINTHO, 2005) com misturas solo-emulsão (RL-1C análoga a utilizada neste trabalho), sem aeração, obtiveram bons resultados quanto ao desempenho mecânico concernentes aos ensaios de RCS. Segundo os autores, foram encontrados teores ótimos para baixos teores de emulsão e os mesmos se refletiam para amostras ensaiadas após sete dias de cura. Entretanto, é necessário ressaltar que as condições dos experimentos foram totalmente diferentes ao empregado neste trabalho, a começar pela moldagem dos corpos-de-prova. Os autores citados utilizaram amostras moldadas em cilíndrico Proctor, que diferem daqueles normalmente utilizados nos ensaios de compressão simples, isto é, relação diâmetro pela altura igual a 1:2.

Lucena *et al.* (1982 *apud* Jacintho, 2005) enfatizam que ocorrem diferenças nos resultados de RCS quando se realizam ensaios com corpos-de-prova distintos das usuais

dimensões citadas. Para fins comparativos, a Figuras 5.19 exibem os resultados quanto a RCS, para amostras sem cura.

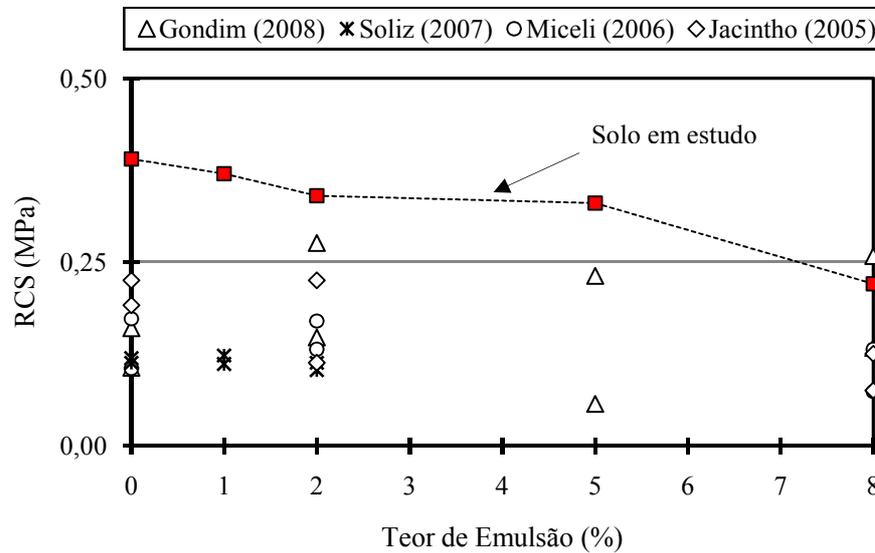


Figura 5.19 – RCS para os solos naturais e misturas solo-emulsão

5.5 TRIAXIAL DE CARGAS REPETIDAS

Moldaram-se os corpos-de-prova visando o ensaio triaxial de cargas repetidas de acordo com os parâmetros de compactação, na energia intermediária, com 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro (conforme o item 5.4.1). Submeteram-se ao ensaio as amostras com 0 dias e após cura ao ar livre pelo período de sete dias, a fim de se verificar a influência da perda de umidade sobre o módulo de resiliência.

Nesta dissertação, optou-se por realizar o mencionado ensaio utilizando a norma americana AASHTO T 307-99. Como já abordado no Capítulo 4 (item 4.5.3), este método mostrou-se mais eficaz que o brasileiro, tendo em vista representar de forma mais aproximada às condições de carregamento em campo. Na escolha dos modelos objetivando a descrição do comportamento resiliente do solo natural e estabilizado, avaliou-se a aplicabilidade do modelo

composto. Vale ressaltar a realização dos experimentos, neste estudo, usando os modelos tradicionais, todavia, os resultados não se mostraram satisfatórios. Conclusões, também, averiguados nos valores de Gondim (2008).

A seguir tem-se nas Tabelas 5.9 e 5.10 os parâmetros referentes ao modelo composto para as amostras com e sem aeração. Para o tratamento dos dados e posterior compilação dos gráficos, fez-se necessário a utilização dos programas LabFit – Ajuste de curvas e o Programa MATLAB, particularmente, com este software foi possível plotar em um mesmo gráfico varias superfícies.

Condição do Corpo-de-prova		Modelo Composto			
		$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$			
Teor de Emulsão (%)	Cura (dias)	k_1	k_2	k_3	R^2
0	0	512,6	0,1988	-0,0253	0,937
	7	1305	0,1263	0,1170	0,936
1	0	421,0	0,2646	0,0228	0,987
	7	1514	0,2020	0,2567	0,981
2	0	368,5	0,2813	-0,1152	0,947
	7	1259	0,1848	0,1096	0,987
5	0	313,1	0,2082	-0,1181	0,949
	7	1076	0,1099	0,1138	0,957
8	0	334,0	0,1889	-0,1279	0,954
	7	1033	0,1171	0,1264	0,930

Tabela 5.9 – Parâmetros do modelo composto – com aeração

Verifica-se, por meio das Tabelas 5.9 e 5.10, que para ambos os tempos de aeração (0h e 1 hora) os coeficientes de correlação R^2 apresentaram uma aplicabilidade desse modelo a todas as situações estudadas. Nota-se, ainda, que a dependência do estado de tensões está em

função dos resultados de k , ou seja, quanto maior o valor de k maior será a dependência da tensão correspondente. Essa ressalva ratifica as observações comentadas nos estudos de Miceli (2006).

Condição do Corpo-de-prova		Modelo Composto			
		MR = $k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$			
Teor de Emulsão (%)	Cura (dias)	k_1	k_2	k_3	R^2
0	0	419,2	0,3754	-0,0657	0,951
	7	1133	0,1530	0,1553	0,975
1	0	424,7	0,3641	-0,0372	0,982
	7	1102	0,2013	0,0974	0,962
2	0	404,4	0,3624	-0,0986	0,952
	7	1141	0,1543	0,1482	0,957
5	0	465,0	0,2196	0,0805	0,987
	7	1043	0,2233	0,1834	0,975
8	0	423,9	0,3617	-0,0322	0,939
	7	1086	0,1408	0,2324	0,948

Tabela 5.10 – Parâmetros do modelo composto – sem aeração

Nas Figuras 5.20 e 5.21 têm-se as umidades residuais dos corpos-de-prova verificadas após os ensaios. Observa-se que, a cura ao é suficiente para que ocorra uma significativa perda da água contida no material, porquanto, tais parâmetros estão muito próximos da umidade higroscópica do solo natural. Verificou-se que, tal comportamento não reforçou as afirmações de Kézdi e Kétháti (1988, *apud* JACINTHO, 2005). Segundo os autores, o aumento dos teores de emulsão asfáltica nos corpos-de-prova possibilitaria o bloqueio dos vazios dificultando a saída da água. No entanto, nota-se que as umidades residuais das

amostras sem betume, após um período de 7 dias, obtiveram valores aproximados àquelas das misturas solo-emulsão.

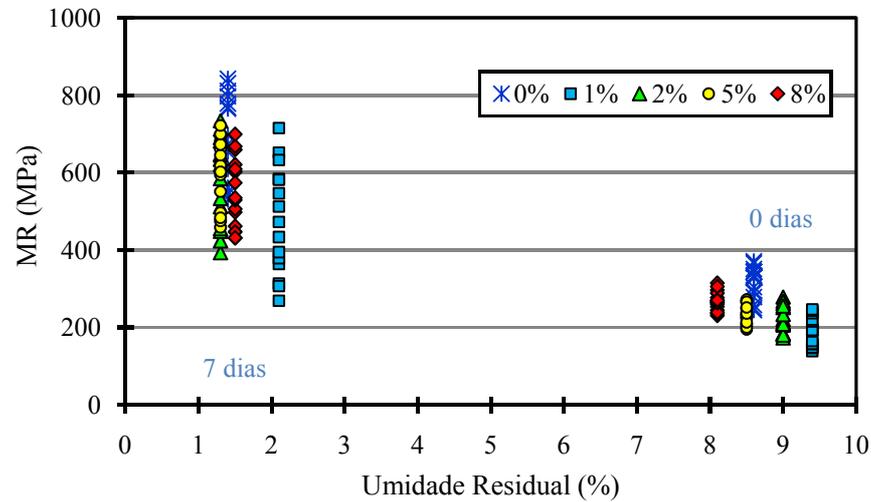


Figura 5.20 – Umidade residual das amostras após ensaios com aeração

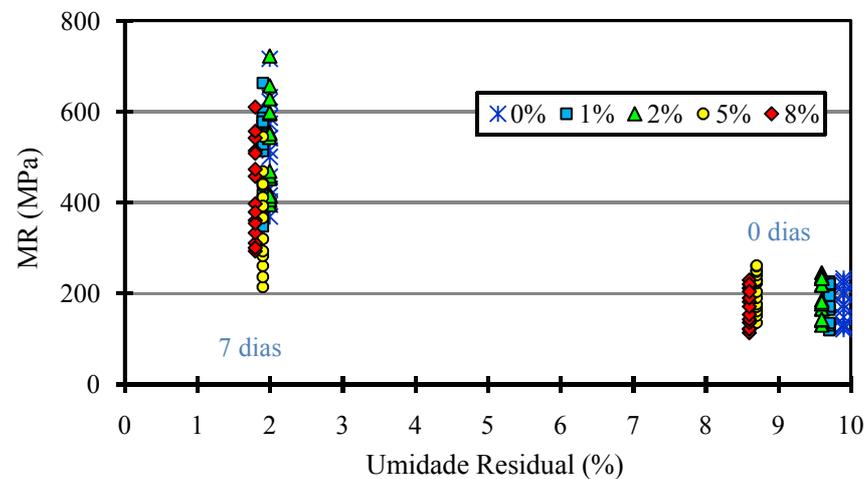


Figura 5.21 – Umidade residual das amostras após ensaios sem aeração

Tendo em vista que, por princípio, os corpos-de-prova de MR são moldados sob duas condições (com e sem aeração), o que significa umidades residuais diferentes, introduziu-se a Figura 5.22 com a finalidade de verificar estas variações. Ressalta-se que tais parâmetros são verificados após cada ensaio.

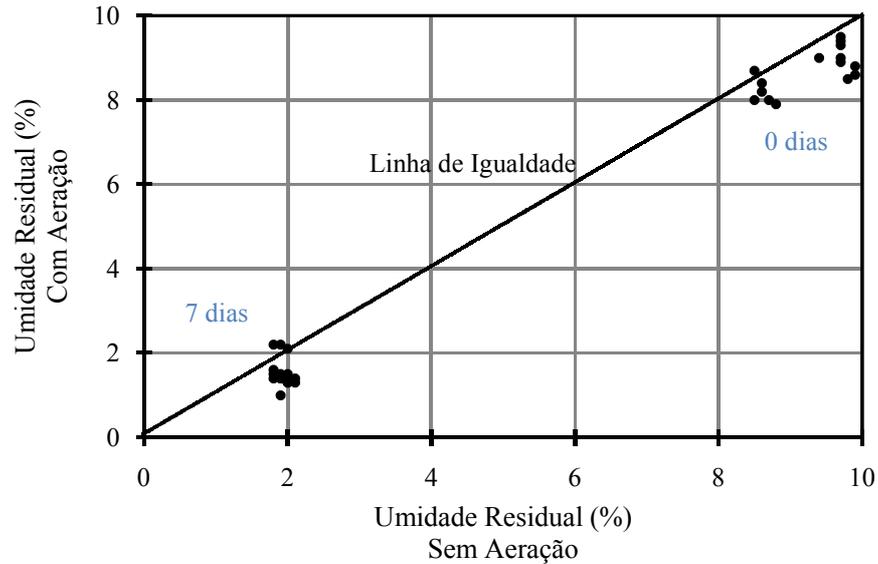


Figura 5.22 – Comparação das umidades residuais para as amostras com e sem aeração

Ao verificar a Figura 5.22, percebe-se que as mencionadas variações são pequenas não chegando a ultrapassar 1%, indicando, igualmente, que as amostras com aeração mostraram-se menos úmidas, devido ao tempo de exposição ao ar livre antes da compactação. Os corpos-de-prova com baixos teores de umidade obtiveram aumento nos valores do módulo de resiliência, levando a concluir que, o fator umidade deve ter contribuído no comportamento resiliente do material.

Outra forma de analisar o modelo composto utilizado na pesquisa em pauta, foi representar graficamente o comportamento por meio de superfícies, tornando possível observar as variações impostas pelos diversos fatores sobre o parâmetro resiliente do solo natural e das misturas solo-emulsão. Com o auxílio de um algoritmo, elaborado por Gondim (2008), pôde-se reunir, em um mesmo gráfico, as superfícies referentes aos diferentes teores de emulsão asfáltica e tempo de cura.

A primeira superfície obtida pelo modelo composto, para a amostra natural com aeração, é apresentada na Figuras 5.23. Nota-se que, o módulo de resiliência do solo para o

ensaio realizado de imediato, é bastante susceptível às variações da tensão de confinamento (σ_3) e mostra menor sensibilidade às mudanças da tensão de desvio (σ_d).

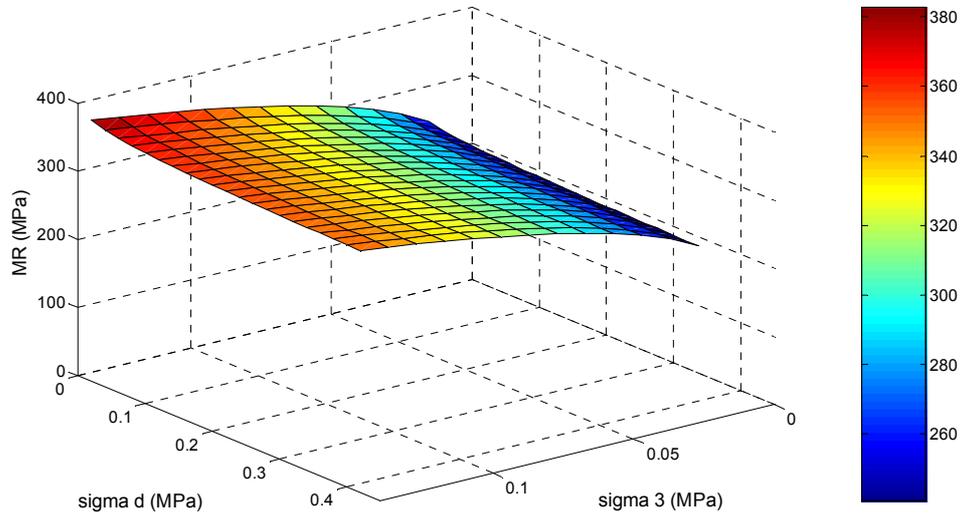


Figura 5.23 – Módulo de resiliência para o solo natural – com aeração

De acordo com Duque Neto (2004), quanto maior a porcentagem de silte na fração fina, menor a sensibilidade do MR as variações da tensão de desvio (σ_d). Por outro lado, esse comportamento resiliente é alterado após sete dias de cura, como indica a Figura 5.24.

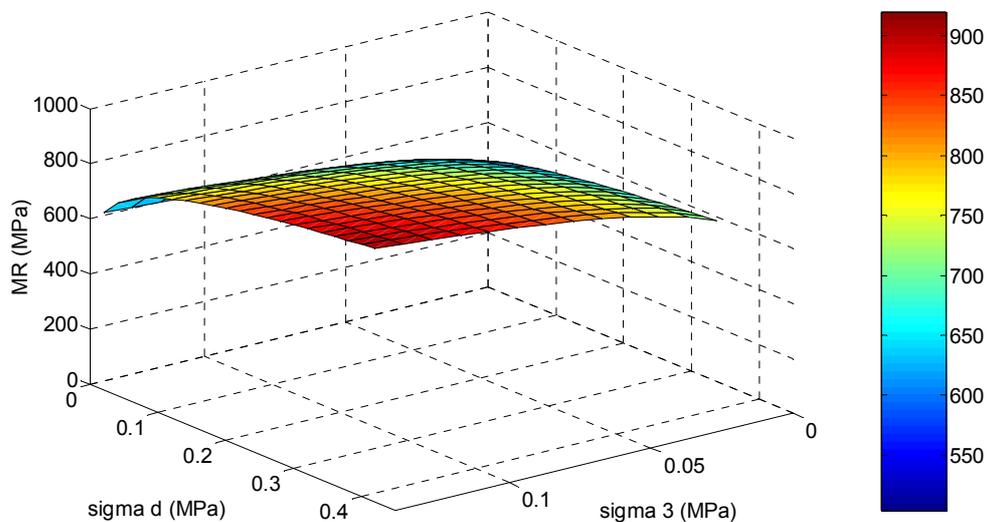


Figura 5.24 – Módulo de resiliência para o solo natural após 7 dias – com aeração

Observa-se na Figura 5.24, que o solo natural se mostra mais dependente da tensão de desvio, comportamento esse que difere da amostra sem cura. É constatado, também, que para estas amostras ocorreram maiores oscilações, se comparado ao solo ensaiado sem cura. Esse tipo de comportamento verifica-se nos estudos realizados por Gondim (2008). As Figuras 5.25 e 5.26 apresentam os comportamentos resiliente do solo natural, ensaiado de imediato e após cura, respectivamente, sob a condição sem aeração.

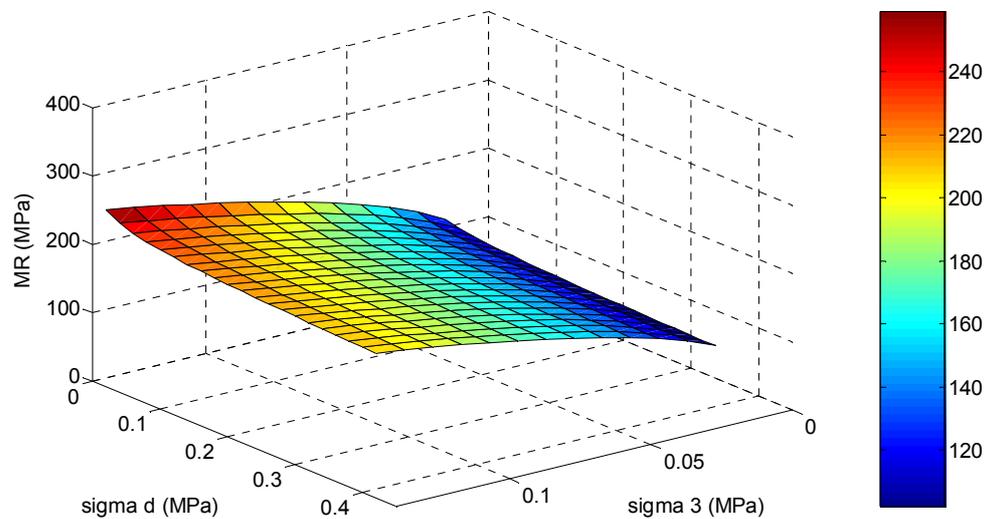


Figura 5.25 – Módulo de resiliência para o solo natural – sem aeração

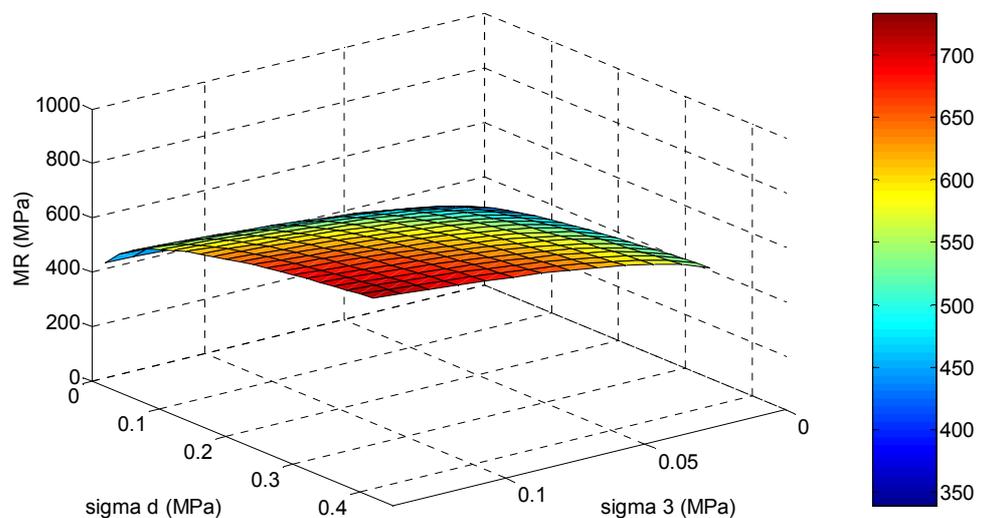


Figura 5.26 – Módulo de resiliência para o solo natural após 7 dias de cura – sem aeração

Segundo as Figuras 5.25 e 5.26 as amostras sem aeração não mostraram modificações nas superfícies, ou seja, apresentaram o mesmo comportamento resiliente anteriormente visto nas amostras com aeração. Todavia, os valores de MR's se mostraram inferiores. Como contribuição ao anteriormente abordado, tem-se a Figura 5.37, onde se reuniu as duas superfícies, com e sem aeração, em um gráfico, além das informações com e sem cura.

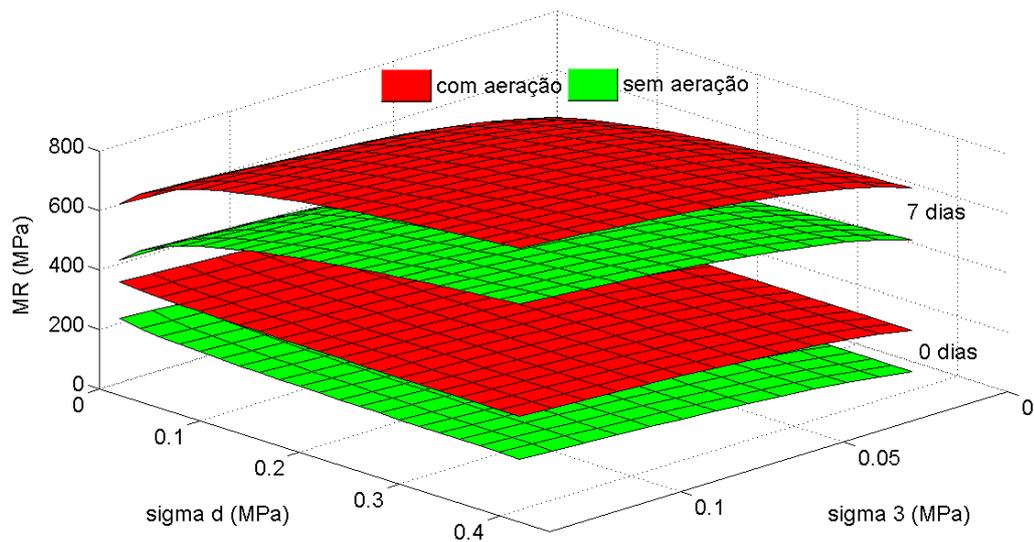


Figura 5.27 – Módulo de resiliência para o solo natural em diferentes condições

Com respeito à apreciação do comportamento resiliente das amostras em relação às tensões, observa-se por meio da Figura 5.27, que a independência do solo natural, sem cura, da tensão de desvio é afetada após um período de sete dias, conduzindo-o a uma incondicional dependência da referida tensão.

Visando, ainda, entender a influência dos parâmetros σ_d e σ_3 , no modelo composto, elaboraram-se os gráficos apresentados nas Figuras 5.28 a 5.31. As superfícies referentes a cada teor de emulsão foram agrupadas com seus respectivos tempos de cura e condições de aeração, conforme visto para o solo natural. Nota-se, que, o comportamento resiliente das misturas solo-emulsão, tanto para o ensaio de imediato quanto após um tempo de cura, apresentaram similaridade nas superfícies relativo ao solo natural.

É relevante, igualmente, observar que ao comparar as reduções dos valores do MR, tem-se que, as misturas solo-emulsão, sem aeração relativas ao tempo de cura de sete dias, sofreram uma leve redução nos valores do citado módulo. Fato que se torna evidente com o aumento do teor de emulsão asfáltica.

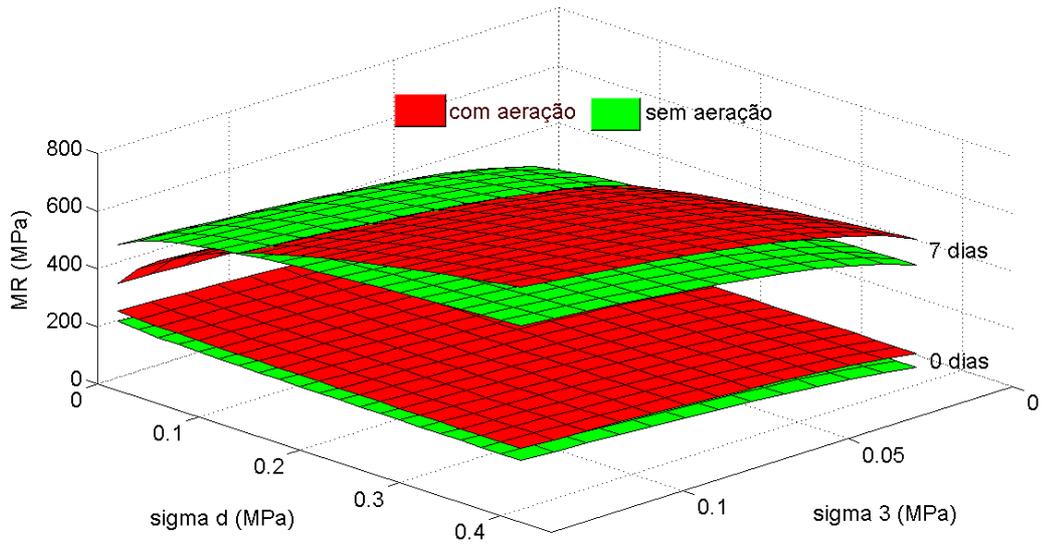


Figura 5.28 – Módulo de resiliência para o solo com 1% de emulsão em diferentes condições

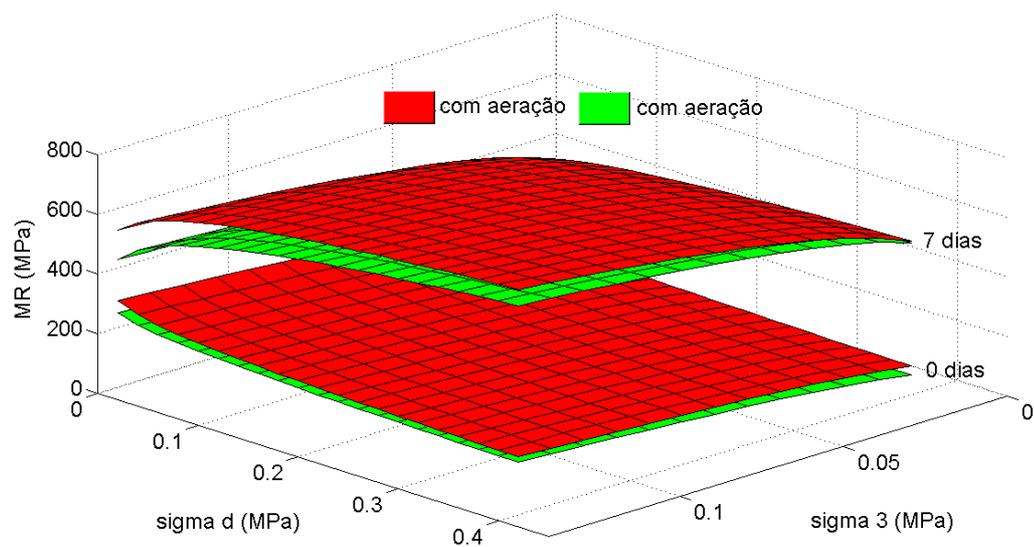


Figura 5.29 – Módulo de resiliência para o solo com 2% de emulsão em diferentes condições

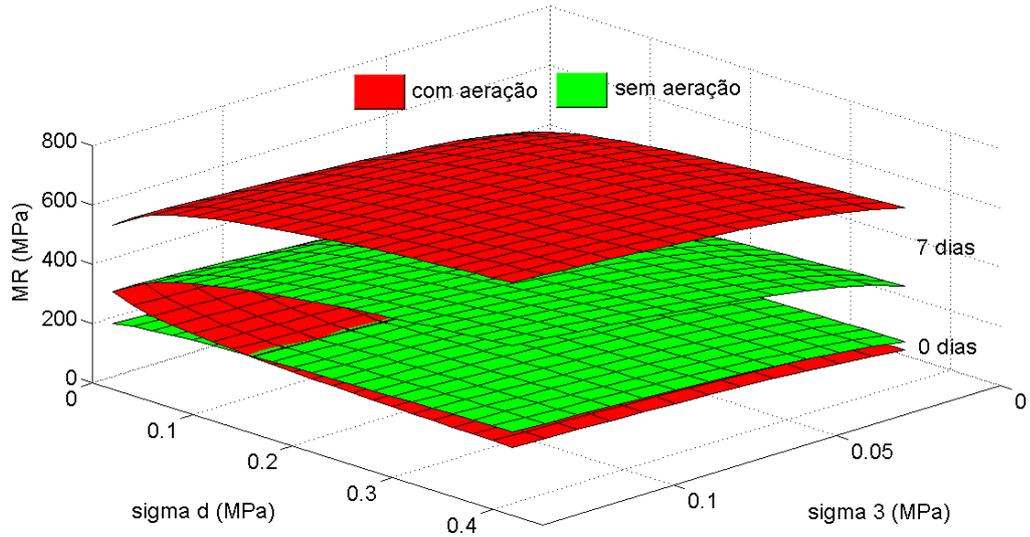


Figura 5.30 – Módulo de resiliência para o solo com 5% de emulsão em diferentes condições

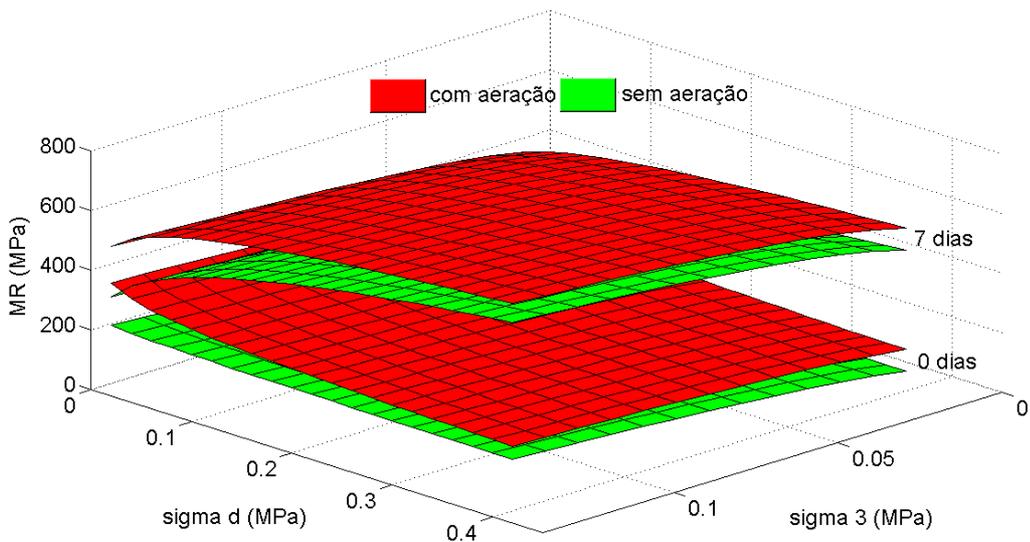


Figura 5.31 – Módulo de resiliência para o solo com 8% de emulsão em diferentes condições

Nas condições sem aeração algumas amostras com 8% de emulsão mostraram-se excessivamente deformáveis, não tolerando a fase de aplicações de cargas do ensaio triaxial dinâmico. Essas amostras se deformaram de tal forma que os LVDT's não foram capazes de realizar as medições dos deslocamentos, tornando-se impraticável a realização do experimento.

A Figura 5.32 apresenta os gráficos em que são agrupadas as superfícies referentes ao solo natural e as misturas para diferentes teores de emulsão, concernente ao ensaio de imediato com aeração. Neste gráfico é possível visualizar claramente, sob diferentes ângulos, a inferioridade dos valores de MR's das misturas comparado ao solo natural. Apesar da ocorrência de acréscimos de MR das amostras com o aumento dos teores de emulsão, o solo natural, ainda sim, apresentou valores superiores aos demais. Atenta-se, que as amostras com e sem betume mostraram, igualmente, ser mais dependentes para baixas tensões de desvio.

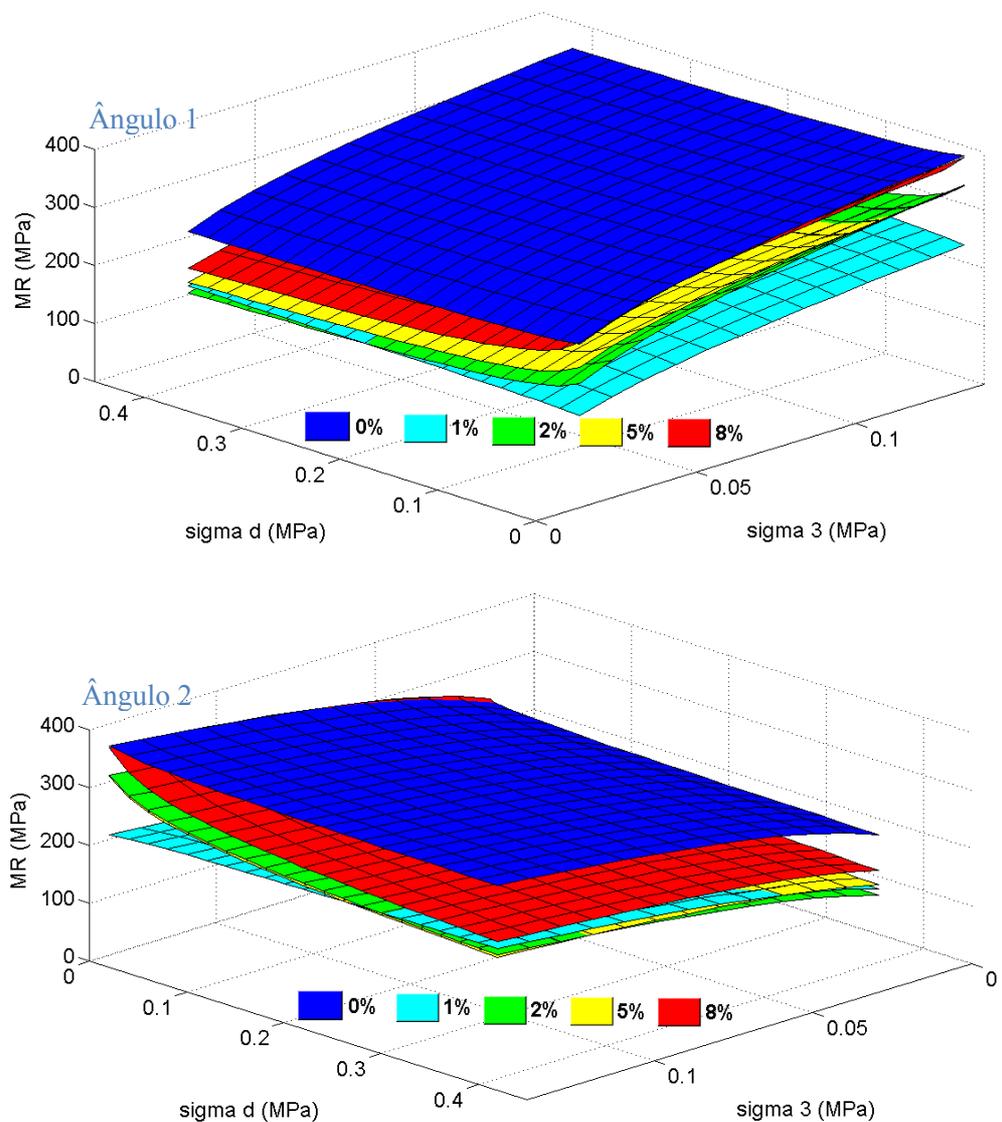


Figura 5.32 – Gráficos comparativos do MR para ensaios de imediato – com aeração

A Figura 5.33 mostra os gráficos das superfícies referentes ao solo natural e suas misturas solo-emulsão, alusivos aos experimentos com aeração. Tal como os resultados indicados na Figura 5.32, o solo natural independente do ângulo que se visualize, apresenta valores do parâmetro MR superior a todos os valores das misturas solo-emulsão.

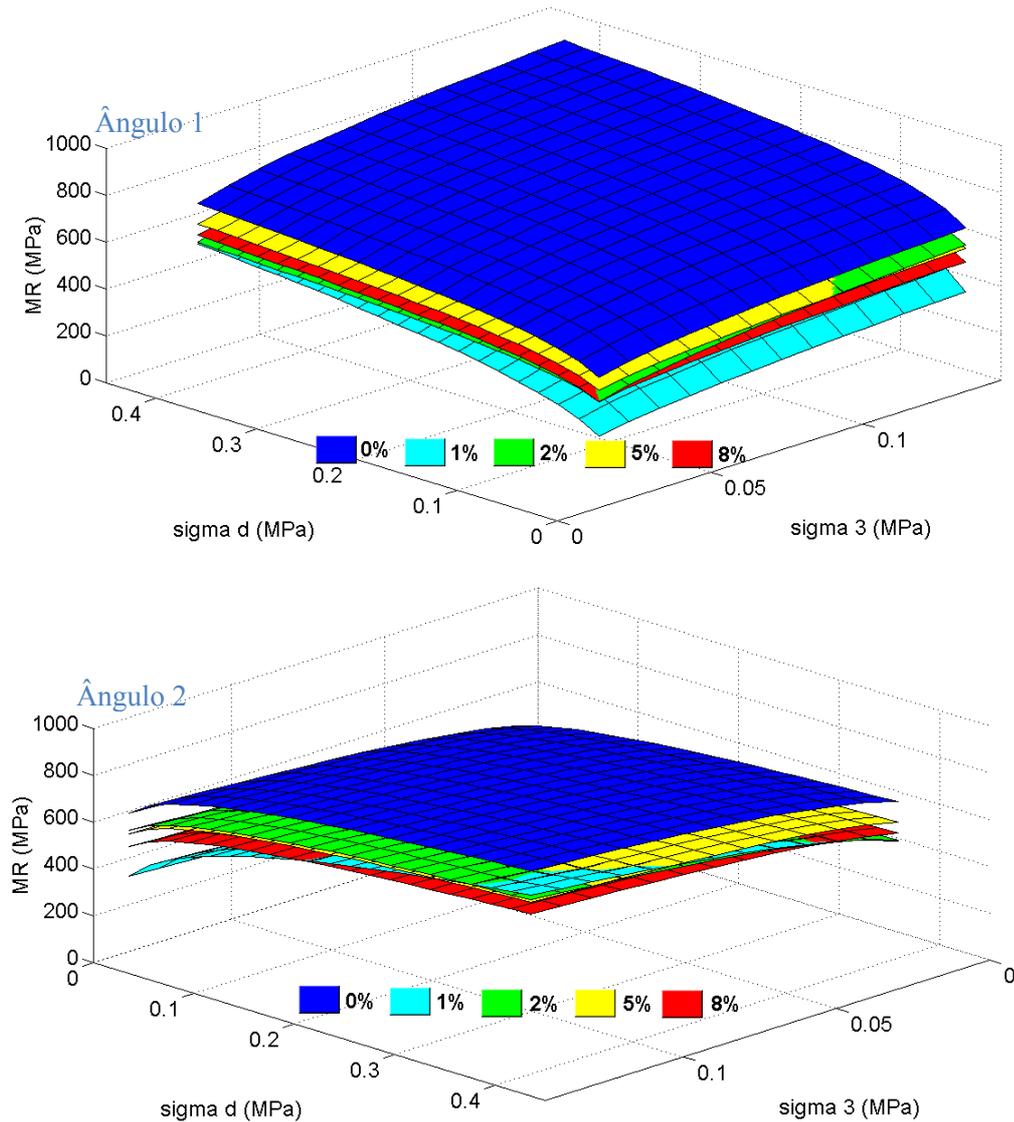


Figura 5.33 – Gráficos comparativos do MR para ensaios após 7 dias – com aeração

Com relação à adição de emulsão asfáltica ao solo, Figuras 5.32 e 5.33, os gráficos indicam que a emulsão promoveu uma redução nos valores do módulo de resiliência, para as condições de cura. Verificou-se, inclusive, que ao 0 dia de cura e para os teores de 5% e 8%

de emulsão resultaram em módulos superiores aos outros teores, enquanto, o teor de 5% tornou a amostra mais vulnerável à variação de cura. Esses resultados indicam, para o solo em estudo, a não existência de um teor ótimo de emulsão que conduza ao seu melhor comportamento resiliente.

Com a finalidade de facilitar a visualização do comportamento resiliente das amostras ensaiadas, introduziu-se a Figura 5.34. Verifica-se que, após 7 dias, grandes oscilações nos valores de MR foram observadas para a amostra com 1% de emulsão, sendo estas variações susceptíveis a baixas tensões de desvio.

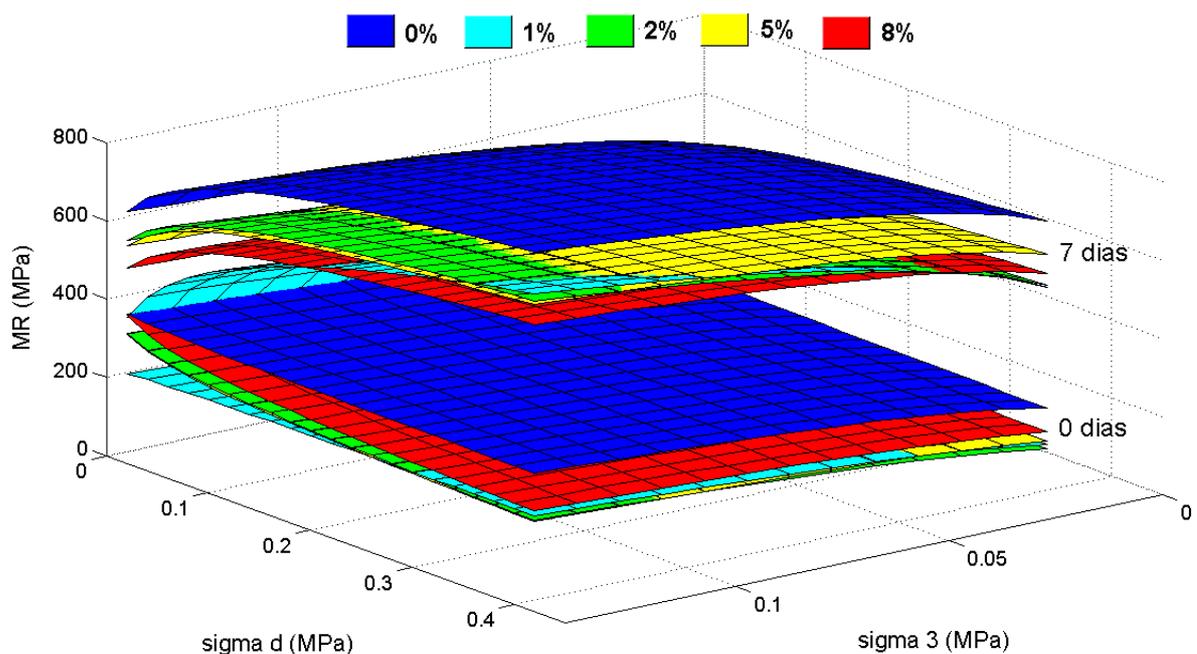


Figura 5.34 – Gráficos comparativos do MR – com aeração

A Figura 5.35 reúne, em um gráfico, o comportamento resiliente das amostras sem aeração, ensaiadas de imediato. Desta vez, são observadas melhorias nos comportamentos resilientes das misturas solo-emulsão, particularmente nos teores de 2% e 5% apresentaram uma ligeira superioridade alusiva ao solo natural.

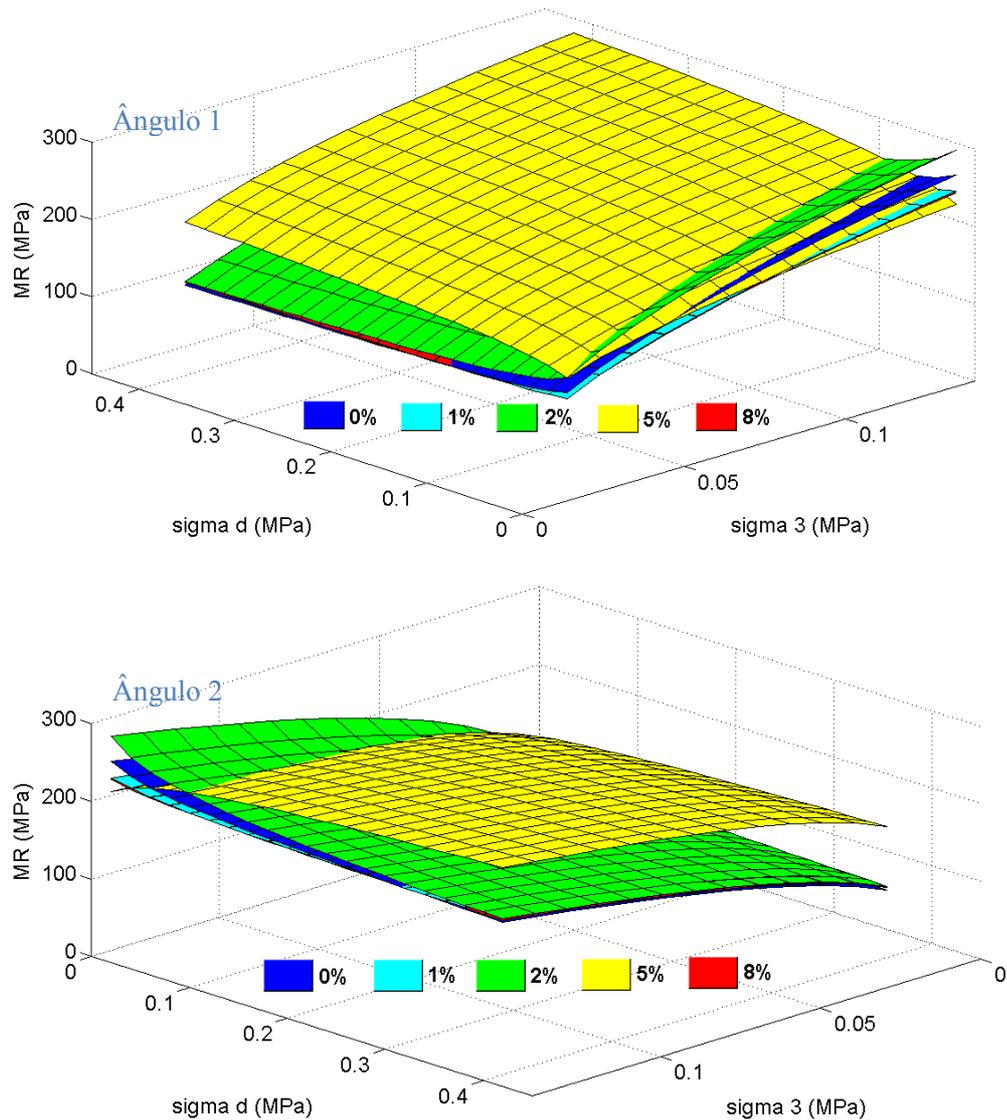


Figura 5.35 – Gráficos comparativos do MR para ensaios de imediato – sem aeração

Pelos resultados contidos na Figura 5.35, tem-se que o ensaio após a compactação resultou módulos de resiliência mais altos que os valores obtidos para o solo natural. Atenção especial é dada ao teor de 5%, onde se observa uma mudança expressiva no comportamento da superfície, especialmente às altas tensões desvio.

A Figura 5.36 reúne, em um gráfico, as descrições resilientes das amostras ensaiadas após sete dias. Observa-se que a adição de 2% promoveu um ligeiro aumento nos valores de MR após sete dias de cura, se comparados aos valores referentes ao solo natural ensaiado sob a mesma condição de cura. Este melhor comportamento resiliente da citada mistura após a

cura de 7 dias, se deve a perda de umidade, aliado a influência teor mencionado da emulsão. Nota-se, ainda, que as superfícies atinentes ao solo natural e às misturas com 1% e 2% de RL-1C, apresentaram-se praticamente superpostas, indicando que o tempo da adição do betume não exerceu influência sobre o MR.

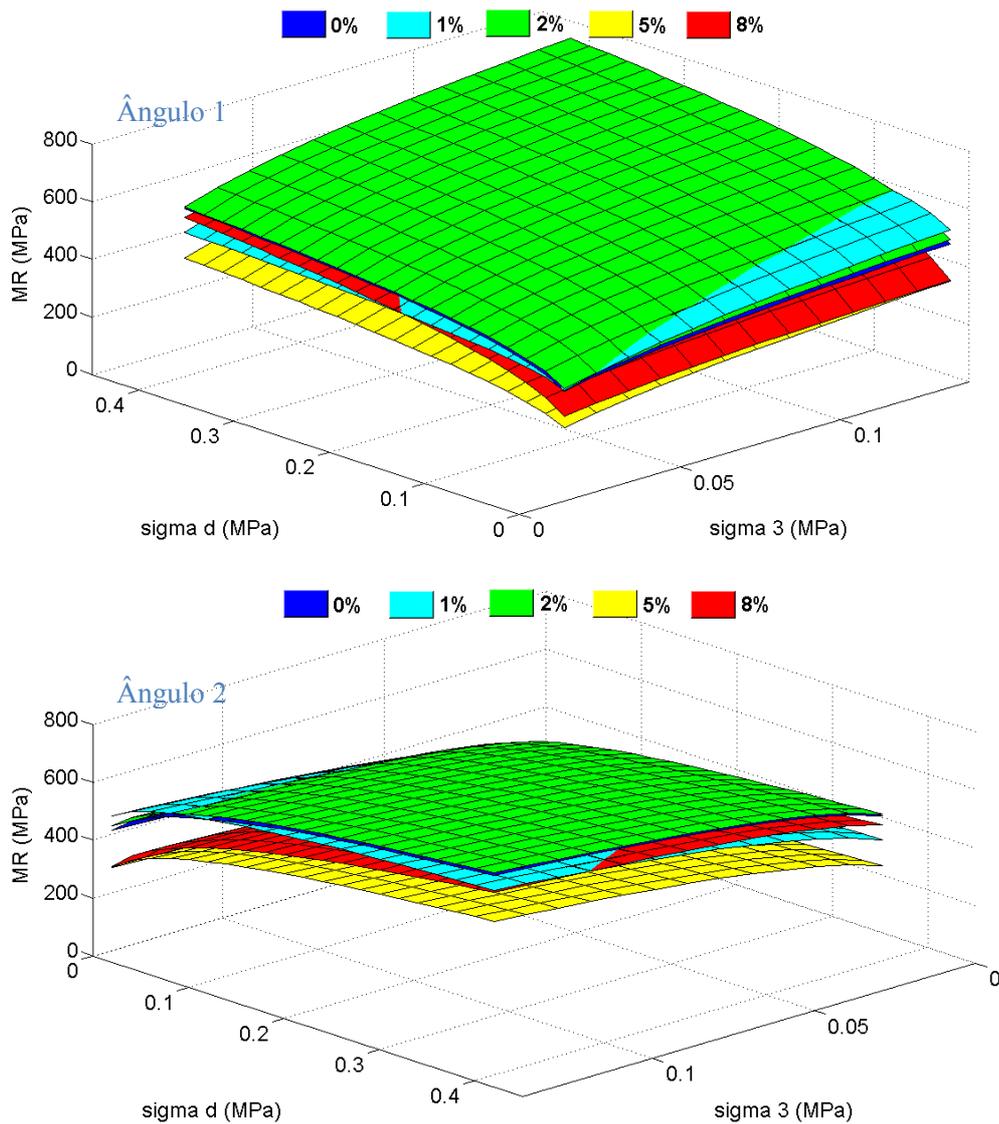


Figura 5.36 – Gráficos comparativos do MR para ensaios após 7 dias – sem aeração

Analisando em sua totalidade os resultados de MR para o solo natural e suas misturas solo-emulsão, verificou-se, por meio da Figura 5.37, que as amostras sem aeração, com 2% emulsão asfáltica e cura de sete dias, mostraram-se com melhor desempenho.

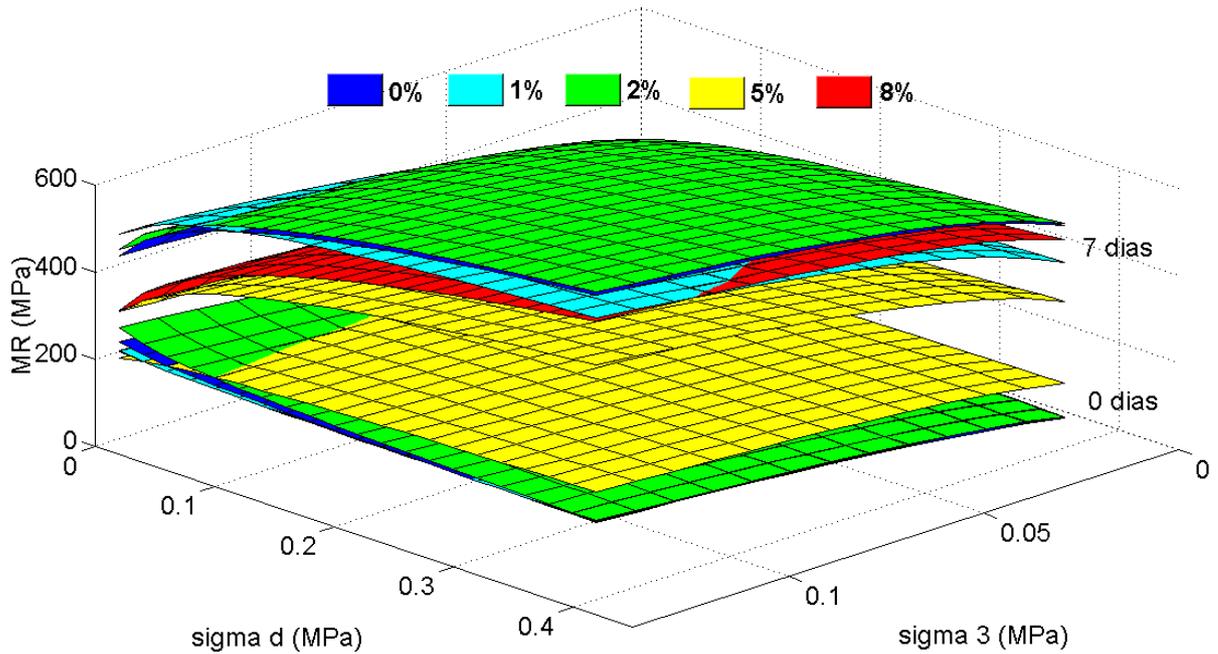


Figura 5.37 – Gráficos comparativos do MR – sem aeração

Estudos semelhantes realizados por Miceli (2006), Soliz (2007) e Gondim (2008), utilizando as mesmas emulsões, indicaram adequabilidade do ensaio de módulo de resiliência na análise da influência da emulsão asfáltica no desempenho mecânico das misturas solo-emulsão. Segundo tais autores foram observadas melhorias significativas para o período de cura de sete dias. Todavia, nas condições de ensaio imediato, após compactação, este comportamento não foi expressivamente evidenciado.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

As conclusões aqui apresentadas baseiam-se na análise dos resultados do programa experimental executado com o solo da região de Urucu e, quando misturado com a emulsão RL-1C, nos teores 1%, 2%, 5% e 8%, visando às obras de pavimentação rodoviária da Base Petrolífera da Petrobras. Buscou-se contemplar, principalmente, o efeito do teor de emulsão, tempo de cura e influência da aeração.

6.1 CONCLUSÕES

6.1.1 Ensaio de caracterização, compactação e ISC

a) A adição da emulsão ao solo natural não alterou significativamente a umidade ótima de compactação, a variação ficou em torno de $\pm 0,6\%$ referente ao parâmetro ótima do solo natural;

b) O acréscimo percentual da emulsão não apresentou mudanças significativas nos valores de $\rho_{dm\acute{a}x}$ e os valores de $w_{\acute{o}t}$ mantiveram-se inalterados;

c) O tempo de uma hora de aeração suscitou mudanças discretas nos parâmetros de compactação das misturas, comparado ao solo natural em estudo, indicando que a ruptura da emulsão tem sua parcela de contribuição, decorrentes da exposição das amostras ao ar livre;

d) As misturas de solo-emulsão estudadas mostraram-se prejudicadas pela inundação, apresentando ISC inferiores aos índices alcançados pelas amostras com solo natural,

indicando que o ensaio é inapropriado para a análise do comportamento de solos estabilizados quimicamente.

6.1.2 Ensaio de resistência à compressão simples (RCS)

a) O solo natural e as suas misturas solo-emulsão, com aeração, ensaiados de imediato, mostraram-se, em geral, superiores as amostras sem aeração, invertendo o comportamento após o período de 7 dias de cura;

b) A mistura solo-emulsão apresentou uma ligeira superioridade ao solo natural para o teor de 1% de emulsão, nas condições de aeração, com ensaios realizados após sete dias de cura;

c) A emulsão asfáltica mostrou-se contribuir com o ganho em resistência durante o período de cura de 7 dias;

d) As amostras solo-emulsão apresentaram um excelente comportamento concernente à deformação.

6.1.3 Ensaio triaxiais de cargas repetidas

a) Mostraram que a influência do fator aeração ocasiona modificações nos valores do MR para as amostras com e sem emulsão;

b) O tempo de cura das amostras influenciou diretamente na dependência ou independência de uns dos estados de tensões;

c) Os ensaios do MR, diferentemente do ISC e RCS, mostraram-se os mais adequados para análise da influência da adição da emulsão asfáltica em solos lateríticos regionais;

d) Os resultados do MR, independente do tempo de cura, para amostras com aeração, mostraram-se superiores às aquelas sem aeração;

e) O percentual de 2% e cura de sete dias, sem aeração, resultou no melhor resultado alusivo à estabilização do solo de Urucu.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Visando dar continuidade a este estudo e contribuir para o conhecimento das potencialidades dos solos lateríticos da região em estudo, têm-se as seguintes sugestões:

a) avaliar a estabilização solo-emulsão de um número maior de solos ocorrentes na região mencionada, objetivando-se um banco de dados para a formação de catálogos de soluções de pavimentação de baixo custo;

b) realizar ensaios aos 3 e 28 dias de cura, visando entender o papel da emulsão e da perda excessiva de umidade;

c) avaliar os efeitos da sucção sobre a resistência das amostras de solo estabilizadas com emulsão asfáltica;

d) avaliar o comportamento mecânico das misturas solo-emulsão quando submetidos ao confinamento com papel filme PVC durante o período de cura;

e) avaliar o comportamento das misturas solo-emulsão segundo os ensaios LWT (*load wheel test*) e WTAT (*wet track abrasion test*);

f) realizar estudos que contemplem a viabilidade econômica do emprego da técnica solo-emulsão em camadas de base de pavimentos;

g) estudar a influência do teor de sílica nas misturas solo-emulsão por meio da análise química e mineralógica do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO, *Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Material*, T 307-99. 2003. p. 43.

ARANCIBIA, D. A. S., PARREIRA, A. B, *Estudo da Resistência e do Módulo de Resiliência de Solos Lateríticos com a Adição de Emulsão Asfáltica*. In: XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Fortaleza, CE, 2008.

ARAÚJO, R. N. A.; LUCENA, F. B.; FERREIRA, H. C. *Propriedades de resistência ao cisalhamento de solos lateríticos estabilizados com emulsão asfáltica catiônica RM-1C*. In: 18º Reunião Anual de Pavimentação. Porto Alegre. 1983. p. 499-418.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS – ABEDA. *Manual básico de emulsões asfálticas. Soluções para pavimentar sua cidade*. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*: NBR-6457. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.

_____. *Emulsões asfálticas – Determinação da carga da partícula*: NBR-6567. Rio de Janeiro, 2000a. 3 p.

_____. *Emulsões Asfálticas Catiônicas - Determinação da desemulsibilidade*. NBR 6569. Rio de Janeiro, 2000.

_____. *Emulsões Asfálticas – Determinação da peneiração*. NBR 1439. Rio de Janeiro, 1999.

_____. *Emulsões asfálticas – Determinação do resíduo da destilação*: NBR-6568. Rio de Janeiro, 2005b. 5 p.

_____. *Emulsões Asfálticas Catiônicas - Determinação da resistência à água*. NBR 6300. Rio de Janeiro, 2001.

_____. *Emulsões Asfálticas - Determinação da ruptura – Método de mistura com filer silício*. NBR 6302. Rio de Janeiro, 2000.

_____. *Emulsões asfálticas – Determinação da sedimentação*: NBR-6570. Rio de Janeiro, 2000c. 3 p.

_____. *Emulsões asfálticas – Determinação da viscosidade Saybolt Furol*: NBR-14491. Rio de Janeiro, 2007a. 8 p.

_____. *Determinação de Ruptura de Emulsões Asfálticas – Método da mistura com cimento*. NBR 6297. Rio de Janeiro, 1971.

_____. *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica*: NBR-6508. Rio de Janeiro, 1984. 8 p.

_____. *Solo – Análise granulométrica*: NBR-7181. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

_____. *Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada*: NBR-12770. Rio de Janeiro, 1992. 4 p.

_____. *Solo – Determinação do limite de liquidez*: NBR-6459. Rio de Janeiro, 1984. 6 p.

_____. *Solo – Determinação do limite de plasticidade*: NBR-7180. Rio de Janeiro, 1984. 3 p.

_____. *Solo – Ensaio de compactação*: NBR-7182. Rio de Janeiro, 1984. 10 p.

_____. *Solo – Índice de Suporte Califórnia*: NBR-9895. Rio de Janeiro, 1987. 14 p.

BERNUCCI, Liedi Bariani, et al. *Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros*. 1. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2007. V.1. 520 p.

CASTRO, César Augusto Alves. *Estudo da Técnica Anti-pó com Emulsão de Xisto em Pavimentos para Baixo Volume de Tráfego*. 2003. 188 f. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CASTRO, Luciana Nogueira. *Reciclagem a Frio “in situ” com Espuma de Asfalto*. 2003. 171 f. Tese. COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CHAVES, Franklin José. *Caracterização Geotécnica de Solos da Formação Barreiras da Região Metropolitana de Fortaleza para Aplicação em Obras Rodoviárias*. 2000. 237 f. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, DNER-ME 131/94. *Solos – módulo de resiliência de amostras compactadas*. Rio de Janeiro, 1994. 8 p.

FROTA, Consuelo Alves, et al. *Estudo da Exploração de Argila para Fins de Calcinação, Visando a Construção de Pavimentos na Província Petrolífera de Urucu-AM-Brasil*. In: V Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnológicas. Trabalho V- 046. Recife, PE, 2006.

FROTA, Consuelo Alves, et al. *Realização de Pesquisa Sobre Agregado de Argila Calcinada*. Relatório de Pesquisa, Universidade Federal do Amazonas, UFAM, Grupo de Geotecnia – GEOTEC, Manaus, AM, Brasil, 2006.

GONDIM, Lilian Medeiros. *Estudo do Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará*. 2008. 213 f. Dissertação de M. Sc., Programa de Mestrado em Engenharia e Transporte, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

GUERREIRO SANTOS, João de Deus. *Contribuição ao Estudo dos Solos Lateríticos Granulares como Camada de Pavimento*. 1998. 342 f. Tese de Doutorado, PEC, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

JACINTHO, Elza Conrado. *Estudo do Comportamento de Misturas Solo-Emulsão para Uso em Barragens*. 2005. 160 f. Dissertação de M. Sc., Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

JAMES, A. *Overview of asphalt emulsion*. E-C102 Circular. Transport Research Board. Washington, 2006.

LIMA, Marisaides Cruz. *Contribuição ao Estudo do Processo Evolutivo de Boçorocas na Área Urbana de Manaus*. 1999. 150 f. Dissertação de M. Sc., Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. *Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica; Efeito da Compactação por Impacto e Giratória*. 2004. 461 f. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MEDINA, Jacques; MOTTA, Laura Maria Goretti. *Apostila de Estabilização de Solos*. Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, Jacques; MOTTA, Laura Maria Goretti. *Mecânica dos pavimentos*. 2. ed. Editora COPPE, Rio de Janeiro, 2005. V.1. 574 p.

MICELI, Junior Giuseppe. *Comportamento de Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica*. 2006. 256 f. Dissertação de M. Sc. Instituto Militar de Engenharia, IME, Rio de Janeiro.

NOGAMI, Job Shuji; VILLIBOR, Douglas Fadul. *Pavimentos de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. Editora Villibor, São Paulo, SP, 1995.V.1. 240 p.

PESSOA, Francisco Hélio Caitano. *Análises dos Solos de Urucu para Fins de Uso Rodoviário*. 2004. 151 f. Dissertação de M. Sc., Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

PETROBRAS.<<http://www2.petrobras.com.br>>. Acesso em 28/07/2009.

RAMOS, Celso Reinaldo. *Estudo para o Desenvolvimento de um Catálogo de Pavimentos Flexíveis do Município do Rio de Janeiro*. 2003. 301 f. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SANT'ANA, Walter Canales. *Contribuição ao Estudo de Solo-Emulsão em Pavimentos de Vias de Baixo Volume de Tráfego para o Estado do Maranhão*. 2009. 341 f. Tese, Departamento de Engenharia e Transporte, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SANT'ANA, W. C., BERNUCCI, L. L. B., LEITE, L. M., *Pavimento em Solo-Emulsão para vias de Baixo Volume de Tráfego*. In: 38º Reunião Anual de pavimentação, 12º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Manaus, AM, Agosto, 2007.

SANTOS, M., LIMA, D., BUENO, B., *Estabilização dos Solos com Cal e Betume*. In: 6º Reunião de pavimentação urbana, pp. 74 – 97, Santos, SP, Abril, 1995.

SENÇO, Wlastermiler. *Manual de Técnicas de Pavimentação*. 1. ed. Editora PINI, São Paulo, SP, 2002.V.2.

SILVA, Ben-Hur de Albuquerque. *Aplicação das Metodologias MCT e Resiliente a Solos Finos do Centro-Norte do Mato Grosso*. 2003. 260 f. Dissertação de M. Sc., Instituto Militar de Engenharia, IME, Rio de Janeiro.

SOLIZ, Valeria Vaca Pereira. *Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica*. 2007. 166 f. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

THULER, Raphael Barbeta. *Estudo de Solos do Estado do Rio de Janeiro para Aplicação em Rodovias de Baixo Volume de Tráfego*. 2005. 125 f. Tese, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

VIEIRA, A. F. G., MOLINARI, D. C., ALBUQUERQUE, A. R. C., *Dinâmica Erosiva em Estradas: BR-174 e Urucu (AMAZONAS)*. In: II Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste. Goiás, 2005.

YODER, E.J. & WITCZAK, M.W. (1975). *Principles of Paviment Design*. John Wiley & Sons, INC, New York, 711p.