ESTUDO DE TRÊS SOLOS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO ASFÁLTICA

Valeria Vaca Pereira Soliz

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

_____
Profª. Laura Maria Goretti da Motta, D.Sc.

_____
Prof. Jacques de Medina, L.D.

_____
Drª. Leni Figueiredo Mathias Leite, D.Sc.

_____
Profª. Liedi Legi Bariani Bernucci, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
OUTUBRO DE 2007

SOLIZ, VALERIA VACA PEREIRA

Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica [Rio de Janeiro] 2007.

XVI, 166 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Estabilização de solos
2. Solo-emulsão
3. Módulo de resiliência

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Aos meus pais, Coyín e Mercy,
e aos meus irmãos Nina e Aurelio,
pela força, esforço e apoio durante estes anos longe de vocês.

A Pochito, por nosso abraço de despedida.

AGRADECIMENTOS

A toda minha família, por acreditarem em mim, pelos sentimentos que nos unem e os ensinamentos de vida.

Aos meus pais, pela vida a mim dada; à eles e aos meus irmãos, obrigada pela amizade e por todo aquilo que vivemos juntos durante todos os anos de convivência diária.

Ao meu tio Jorge, quem me deu uma mão para que fosse possível meu ingresso na UFRJ, e à minha tia Marisol, que me acolheu em sua casa e tem sido um grande apoio nestes anos de mestrado.

Ao Professor Ian Martins, que ajudou para que continuasse no mestrado e conseqüentemente a chegasse até aqui.

À Prof. Laura Maria Goretti da Motta, pela dedicação e colaboração que se vê refletida neste trabalho; obrigada pelo carinho, a compreensão, a enorme paciência e sobre tudo por dar me força e transmitir me confiança nos momentos que mais precisei.

Ao Prof. Jacques de Medina, porque mesmo não tendo contato direto, representa muito para a área de pavimentos por todas as contribuições realizadas; obrigada também pelas sugestões feitas nesta dissertação.

Aos professores Willy Lacerda, Ana Laura Nunes, Ian Schumman, Fernando Danzinger, Maurício Erlich, Francisco Lopes, Márcio Almeida, Paulo Santa Maria, Francisco Casanova, pelos conhecimentos transmitidos nas cadeiras do mestrado e pelas conversas nos corredores do laboratório.

À CAPES pela bolsa de estudos, à COPPETEC e CTPETRO/PETROBRAS pelo apoio financeiro e pelas facilidades concedidas para a realização deste trabalho.

À Rodrigo Muller, pela essencial contribuição no andamento desta dissertação tanto na parte experimental como na redação, obrigada pela disponibilidade e também pela amizade e o carinho.

À Bororó, que além da ajuda com os ensaios, é um grande amigo e confidente, obrigada pelas discussões e papos durante o trabalho no laboratório.

À todo o pessoal de pavimentos obrigada pelos conhecimentos transmitidos, à colaboração nos ensaios e a disposição.

À Sala 5 do laboratório, especialmente a Marcelinha, que me deu força nos momentos fracos e com quem também compartilhei muitas novidades boas.

À todos os gatinhos e gatinhas que formam parte do laboratório de Geotecnia, professores, alunos, técnicos, administrativos, pessoal de segurança e de limpeza, obrigada pela excelente acolhida, a boa bondade, a grande ajuda, os conselhos, a força, os papos, a amizade, a confiança, os fortes abraços, em fim, o dia a dia que me fez adotar vocês como minha família desde o começo do mestrado.

À toda a turma que ingressou no 2005, especialmente aos meus gatinhos: Pedro, Gustavo, Anselmo e Ysrael, pela grande colaboração, a confiança, o carinho, a disposição e a amizade que a gente têm desde o começo das aulas.

À colega e grande amiga, Valeria, quem me deu apoio e me ajudou a suportar a distância. Obrigada pelo carinho, a amizade e por tudo o vivido juntas, porque nesta caminhada madureci e aprendi muito da nossa convivência.

À Claudia, pelo tempo que moramos juntas, pelas contribuições e conversas durante as horas de estudo, pelo afeto e a amizade.

À Victoria, pela confiança, carinho e amizade neste tempo de morar juntas.

À todas as pessoas que fizeram parte da minha vida durante estes anos fora de casa, obrigada pelas experiências vividas.

Aos meus Professores de Santa Cruz de la Sierra, obrigada pelos ensinamentos transmitidos durante minha formação profissional que me ajudaram muito na realização do mestrado.

Aos meus amigos e amigas de Santa Cruz de la Sierra, que me demonstraram sempre seu carinho e apoio a pesar da distância.
Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DE TRÊS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO ASFÁLTICA

Valeria Vaca Pereira Soliz

Outubro/07

Orientador: Laura Maria Goretti da Motta
Programa: Engenharia Civil

O objetivo deste trabalho é o estudo do comportamento de três solos de diferentes texturas, do Estado do Rio de Janeiro, em misturas com diversos teores de emulsão asfáltica, sob o ponto de vista da mecânica dos pavimentos. O programa experimental compreendeu; coleta de amostras no campo, ensaios de caracterização (peneiramento, sedimentação, limites de liquidez e plasticidade); ensaio de compactação Proctor Normal; ensaio segundo a metodologia MCT (Miniatura Compactado Tropical), mistura dos solos com as emulsões asfálticas, moldagem de corpos-de-prova, ensaios triaxiais dinâmicos, ensaios de resistência à compressão simples(RCS) e ensaios de desgaste: Load Wheel Test (LWT) e Wet Track Abrasion Test (WTAT). Procedeu-se à análise estrutural de pavimentos hipotéticos em que suas camadas de base e revestimento (vias de baixo volume de tráfego) fossem constituídas pelo solo – emulsão asfáltica. Pôde-se apurar o conhecimento da viabilidade de estabilização de solos de diferentes texturas com as emulsões asfálticas
RM-1C e RL -1C e das técnicas de ensaio de laboratório.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ESTUDY OF THREE SOILS STABILIZED WITH ASPHALT EMULSION

Valeria Vaca Pereira Soliz

October/2007

Advisor: Laura Maria Goretti da Motta
Department: Civil Engineering

The purpose of this work was to study the behavior of three soils of different textures, from the State of Rio de Janeiro, when mixed with asphalt emulsion at several percentages, under the point of view of the pavements mechanics. The experimental program was: sampling of soils in the field, identification testing (sieving, sedimentation, liquid and plastic limits), Proctor standard compaction test, testing according to Brazilian methodology MCT (Miniature Compacted Tropical),mixing of soil-emulsion, molding specimens for dynamic triaxial tests, unconfined compression tests: Load Wheel Test (LWT) modified and Wet Track Abrasion Test (WTAT) modified. Structural analysis of assumed pavements with soil-emulsion in base and wearing course (low volume traffic roads) is made. It became possible to improve knowledge concerning the feasibility of stabilizing soils of different textures with the asphalt emulsions RM-1C (CMS-1) and RL-1C (CSS-1), and to improve laboratory testing techniques.

INDICE

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO 01

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 05

2.1 Estabilização de solos 05

2.1.1 Estabilização Mecânica 06

2.1.2 Estabilização Física 08

2.1.3 Estabilização Química 09

2.2 Solo-Asfalto 13

2.2.1 As emulsões asfálticas 16

2.2.2 Estabilização de solos com emulsões asfálticas 19

2.2.3 Pesquisas realizadas com solo-emulsão 23

2.3 Métodos de dimensionamento 27

2.3.1 Modulo de resiliência 29

2.3.2 Programa FEPAVE (Finite Element Analysis of Pavement Structures) 33

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS 36

3.1. Materiais 36

3.1.1. Emulsões Asfálticas 36

3.1.1.1. Caracterização das Emulsões 36

3.1.2. Solos: Definição das jazidas 37

3.1.2.1. Pedra de Guaratiba 37

3.1.2.2. Campo Grande 38

3.2. Andamento da parte experimental..... 39

3.3. Determinação das quantidades de materiais para à mistura 41

3.4. Preparação das amostras de solo 44

3.5. Procedimento de mistura Solo-Emulsão 46

3.6. Ensaios realizados 49

3.6.1. Ensaios realizados com solos puros 49

3.6.2. Ensaios realizados com solos puros e com solo-emulsão .. 49

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS 61

4.1. Classificação de solos estudados 61

4.1.1. Caracterização física 61

4.1.2. Classificação MCT 62
4.2. Compactação 63
4.3. Resistência à compressão simples 64
4.3.1. Solo 1 64
4.3.2. Solo 2 66
4.3.3. Solo 3 68
4.4. Triaxial dinâmico 70
4.4.1. Solo 1 71
4.4.2. Solo 2 75
4.4.3. Solo 3 78
4.5. Absorção 81
4.5.1. Solo 1 82
4.5.2. Solo 2 85
4.5.3. Solo 3 85
4.6. Ensaios de desgaste 86
4.6.1. LWT 88
4.6.1.1. Solo 2 89
4.6.1.2. Solo 3 90
4.6.2. WTAT 91
4.6.2.1. Solo 2 92
4.6.2.2. Solo 3 93
4.7. Comparação com os resultados obtidos por MICELI (2006)..... 93
4.8. Dimensionamento pelo Método da COPPE/UFRJ..... 96
4.8.1. Solo 1 97
4.8.2. Solo 2 98
4.8.3. Solo 3 99

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES..... 101
5.1 Considerações finais..... 101
5.2 Conclusões..... 102
5.3 Sugestões para pesquisas futuras..... 103

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 104
ANEXO A..... 109
ANEXO B..... 116
ANEXO C..... 123
ANEXO D..... 130

ANEXOS E 136
ANEXOS F 139

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Requisitos de solos a serem estabilizados com emulsão (MICELI, 2006). …… 21

Tabela 2.2: Primeiros modelos de comportamento tensão-deformação de solos observados no Brasil ……. 33

Tabela 2.3: Modelos matemáticos de expressão do módulo de resiliência de solos e materiais de pavimentação em função do estado de tensões (MEDINA e MOTTA, 2005) ……. 34

Tabela 3.1: Ensaios realizados nas emulsões asfálticas utilizadas neste estudo. …… 37

Tabela 3.2: Exemplo de resultados da planilha de EXCEL utilizada no cálculo para preparação dos corpos-de-prova ……... 44

Tabela 3.3: Ensaios de caracterização realizados …… 49

Tabela 4.1: Resultados da caracterização dos solos utilizados …….. 62

Tabela 4.2: Coeficientes resultantes do processamento de dados obtidos (MCT) 63

Tabela 4.3: Resultados dos ensaios dinâmicos do Solo 1 em todas as condições de moldagem..... 75

Tabela 4.4: Resultados dos ensaios dinâmicos do Solo 2 em todas as condições de moldagem..... 78

Tabela 4.5: Resultados dos ensaios dinâmicos do Solo 3 em todas as condições de moldagem..... 81

Tabela 4.6: Atribuições para desempenho do ensaio LWT – base imprimada, propostas por DUQUE NETO (2004) …….. 88

Tabela 4.7: Conceitos para qualificação do ensaio LWT, propostas por DUQUE NETO (2004) …… 89

Tabela 4.8: Solo 2: qualificação do ensaio LWT …… 89

Tabela 4.9: Solo 3: qualificação do ensaio LWT ……... 91

Tabela 4.10: Atribuições para desempenho do ensaio WTAT – base imprimada, propostas por DUQUE NETO (2004) …….. 92

Tabela 4.11: Conceitos para qualificação do ensaio WTAT, propostas por DUQUE NETO (2004) …… 92

Tabela 4.12: Solo 2: qualificação do ensaio WTAT ……. 93

Tabela 4.13: Solo 3: qualificação do ensaio WTAT ……. 93

Tabela 4.14: Classificação dos solos estudados nesta pesquisa e na de MICELI (2006)……..... 94

Tabela 4.15: Resultados de MR (MPa) obtidos com os 6 solos ensaiados 95

Tabela 4.16: Resultados obtidos com o Programa FEPAVE para o Solo 1 98

Tabela 4.17: Resultados obtidos com o Programa FEPAVE para o Solo 2 99

Tabela 4.18: Resultados obtidos com o Programa FEPAVE para o Solo 3 100

Tabela 4.19: Resultados obtidos na segunda tentativa,com o Programa FEPAVE para o Solo 3..... 100

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Seção tipo de revestimento primário com estabilização betuminosa usada no Ceará (CHAVES,2007)..... 14

Figura 2.2: Trechos de rodovias do Ceará em revestimento primário apresentando resquísios de solo-betume, vista geral e detalhe (CHAVES, 1007) 15

Figura 2.3: Amostra de solo-betume do trecho Belém-Icapuí (Ceará), removido em 1989 (CHAVES, 2007)..... 15

Figura 2.4: Trecho antigo de solo-emulsão na RJ 148 no estado do Rio de Janeiro cerca de 20 anos após construção (THULER, 2005)..... 16

Figura 2.5: Fluxograma de um método mecanístico de dimensionamento de pavimentos (MOTTA, 1991) …….. 28

Figura 2.6: Equipamento triaxial dinâmico …….. 30

Figura 2.7: Câmara triaxial ……... 31

Figura 3.1: Distribuição de emulsões em recipientes …….... 36

Figura 3.2: Coleta de material na Pedra de Guaratiba ……. 38

Figura 3.3: Localização das 6 amostras coletadas para cacacterização 38

Figura 3.4: À esquerda, coleta do Solo 2 e a direita coleta do Solo 3… 39

Figura 3.5: Passos do procedimento de preparação de amostras de solo para os ensaios desta dissertação …….. 46

Figura 3.6: Passos do procedimento de mistura de solo-emulsão usado neste estudo……..… 48

Figura 3.7: Passos do procedimento de compactação CPs para ensaios de resistência à compressão simples …… 51

Figura 3.8: Passos do procedimento de compactação CPs para ensiaos Triaxiais …… 53

Figura 3.9: Procedimento inicial de absorção …… 54

Figura 3.10: Passos do procedimento de absorção dos CPs …… 55

Figura 3.11: Passos do procedimento de moldagem de CPs e enaio LWT 58

Figura 3.12: Passos do procedimento de moldagem de CPs e enaio WTAT 59

Figura 4.1: Curvas granulométricas dos 3 solos utilizados ……. 61

Figura 4.2: Classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) ….. 62

Figura 4.3: Curvas de Compactação dos três tipos de solo …… 63

Figura 4.4: Solo 1: resultados de RCS (KPa) em CPs com 7 e 28 dias de cura …… 64

Figura 4.5: Solo 1: resultados de RCS (KPa) em CPs com 7 dias de cura …… 65

Figura 4.6: Aspecto dos CPs ensaiados imediatamente após moldagem ……..... 66

Figura 4.7: Solo 2: resultados de RCS (KPa) em CPs moldados na hora …… 67

Figura 4.8: Solo 2: resultados de RCS (KPa) em CPs com 7 dias de cura …… 68

Figura 4.9: Solo 3: resultados de RCS (KPa) em CPs moldados na hora …… 69

Figura 4.10: Solo 3: resultados de RCS (KPa) em CPs com 7 dias de cura …… 70

Figura 4.11: Solo 1: resultados de MR (MPa) de CPs com 7, 28 e 56 dias cura …… 72

Figura 4.12: Solo 1: resultados de MR (Mpa) de CPs moldados na hora …… 74

Figura 4.13: Solo1: resultados de MR (MPa) de CPs com 7 dias de cura …… 74

Figura 4.14: Solo 2: resultados de MR (MPa) de CPs moldados na hora …… 76

Figura 4.15: Solo 2: Diferencia de deformação entre CPs moldados na hora e com dias de cura ao ar …… 76

Figura 4.16: Solo 2: resultados de MR (MPa) de CPs com 7 dias de cura …… 77

Figura 4.17: Solo 3: resultados de MR (MPa) de CPs moldados na hora …… 79

Figura 4.18: Solo 3: resultados de MR (MPa) de CPs com 7 dias de cura …… 80

Figura 4.19: Solo 1: resultados de MR (MPa) com 7, 28 e 56 dias de cura, após 48 horas de absorção …… 83

Figura 4.20: Solo 1: resultados de MR (MPa) de CPs moldados na hora, após 48 horas de absorção …… 84

Figura 4.21: Solo 1: resultados de MR (MPa) de CPs com 7 dias de cura, após 48 horas de absorção ……. 84

Figura 4.22: Solo 2: resultados de MR (MPa) de CPs com 7 dias de cura, após 48 horas de absorção ……. 85

Figura 4.23: Solo 3: CPs que romperom antes do ensaio triaxial ……. 86

Figura 4.24: Solo 3: resultados de MR (MPa) de CPs com 7 dias de cura, após absorção …….. 87

Figura 4.25: Solo 2: resultados de LWT de CPs com 7 dias de cura ….. 90

Figura 4.26: Solo 3: resultados de LWT para CPs moldado ……. 91

Figura 4.27 Tipos de estrutura analisados com o Programa FEPAVE… 96

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

Quando se faz um projeto de pavimentos pretende-se conferir ao usuário conforto e segurança por meio de um dimensionamento o mais econômico possível. Isto pode ser conseguido maximizando o uso de materiais locais, o que exige uma análise de disponibilidade e adequabilidade dos solos encontrados nas proximidades do local do projeto.

Ao se falar em disponibilidade toma-se em conta a distância a que este material se encontra da obra e ao se falar em adequabilidade trata-se de analisar a resistência às solicitações mecânicas e ação dos agentes climáticos para um determinado período de projeto. No sentido da durabilidade dos solos, muitas vezes os materiais encontrados não satisfazem uma ou algumas das exigências estabelecidas e então, vê-se a necessidade de pesquisar a utilização de novos materiais e novas técnicas que levem a soluções satisfatórias.

Na execução de pavimentos de baixo custo, especificamente de tráfego muito leve a médio, uma solução que têm sido implantada em muitos locais graças as pesquisas realizadas no Brasil, é a utilização de solos lateríticos de textura fina. Também se considera importante dar atenção às técnicas de estabilização de solos, que além de melhorar as características dos materiais naturais e permitir o seu emprego nas camadas do pavimento, podem levar a reduções nos tempos de execução, viabilizando a industrialização do processo construtivo, e conseqüentemente propiciando uma economia substancial para o empreendimento.

O incentivo de estudar a estabilização de solo com asfalto começou ao se observar uma experiência nas estradas de terra próximas a campos petrolíferos. Engenheiros rodoviários notaram que a poeira era reduzida quando se espalhava óleo cru e isto também tornava as estradas mais resistentes ao tráfego e às condições climáticas.

Este tipo de estabilização começou com a utilização de asfaltos diluídos de cura rápida e média, já que as emulsões asfálticas catiônicas foram colocadas à disposição do mercado só em 1951, pela ESSO, na França.
No Brasil, as emulsões aniônicas foram introduzidas por volta de 1952 pela SHELL e dez anos mais tarde apareceram no mercado as emulsões asfálticas catiônicas. Posteriormente, entre 1963 e 1965, a Construtora Termaco utilizou 20.000 toneladas na renovação da primeira pista da Rodovia Presidente Dutra, com sucesso, o que concorreu consideravelmente para a consolidação do prestígio das emulsões catiônicas (CASTRO, 2003).

Quanto as pesquisas com solo-asfalto, na década de 1950 e início de 1960, segundo GUARÇONI[1] et al (1988) apud JACINTHO (2005), a divisão de Pesquisas Tecnológicas do Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER), desenvolveu estudos de estabilização com asfaltos diluídos que não chegaram a fornecer qualquer subsídio que permitisse estabelecer especificações e normas para as misturas de solo-betume.

Já na década de 1970, as pesquisas referentes a este tema foram realizadas por VOGT, no Rio de Janeiro e por SCHLOSSER, no Pará. A partir de 1976, foi iniciado um programa de construção de rodovias de baixo custo, onde foi incluído o estudo de solo com emulsão asfáltica e na Universidade Federal de Paraíba realizaram-se vários trabalhos com solo-emulsão para solos da Paraíba, Maranhão e Piauí com apoio financeiro do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), do DNER e da Financiadora de estudos e Projetos (FINEP) (FERREIRA[2] (1980) apud JACINTHO, 2005).

Pesquisas importantes de serem mencionadas são as realizadas por LUCENA et al. (1982), MOMM (1983), ARAÚJO et al. (1983), GUARÇONI et al. (1988), MATTOS et al. (1991), BUENO et al. (1991), CARVALHO et al. (1992), JACINTHO et al. (2005) entre outras, sendo que na maioria destes trabalhos a avaliação têm sido realizada baseada em ensaios de compactação, resistência à compressão simples e CBR (Califórnia Bearing Ratio).

---

[1] GUARÇONI, D.S., MATTOS, A.B.G & GONÇALVES, N.R. *Estabilização de Solos com Betume; Técnicas de Execução*. In: *23° Reunião Anual de Pavimentação*, pp. 447-483, Florianópolis, Santa Catarina, 1988.

[2] FERREIRA, A.M. *Estudo de três solos estabilizados com uma emulsão asfáltica catiônica.* Dissertação de M.Sc., Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1980.

Baseados nestes fatos e tomando em conta que a evolução da mecânica dos pavimentos, facilitada pelos avanços tecnológicos, tem conduzido à certeza de que a utilização de ensaios dinâmicos na caracterização dos materiais de pavimentação e a análise não linear de sistemas em camadas proporcionam os melhores parâmetros de projeto e a consideração mais racional de dimensionamento, nota-se a importância de estudos de solos estabilizados com emulsões asfálticas sob o ponto de vista da resiliência.

Este trabalho faz parte de um projeto de pesquisa intitulado TAPTS (Tratamento Anti-Pó e Tratamento Superficial) que é financiado pelo programa CTPETRO-FINEP-PETROBRAS, coordenado pela COPPE/UFRJ e com a participação do IME, USP-SP, UFMG e UFPR. Por parte do IME, o projeto foi realizado por MICELI (2006), cujos resultados serão citados e comparados no Capítulo 5.

O objetivo desta dissertação é avaliar o método de dosagem aplicado a três diferentes tipos de solos do Estado do Rio de Janeiro, estabilizados quimicamente com emulsões asfálticas, e os ganhos de módulo de resiliência destes solos estabilizados que refletem no dimensionamento mecanístico como bases, sub-bases ou revestimento de pavimentos de baixo volume de tráfego.

A metodologia utilizada para cumprir com estes objetivos consta de quatro pontos igualmente importantes:

- A revisão constante de bibliografia referente ao tema estudado.
- A realização da parte de laboratório que abrange os ensaios de Caracterização, Classificação MCT, Compactação pelo PROCTOR Normal, Mistura do solo-emulsão, ensaios de Resistência à compressão simples, Ensaios Triaxiais Dinâmicos, Absorção, *Loaded Wheel Test* (LWT) e *Wet Track Abrasion Test* (WTAT).
- As análises dos resultados obtidos a partir desses ensaios e a comparação com os resultados obtidos por MICELI (2006).
- O dimensionamento de estruturas hipotéticas com os solos estudados utilizando o Método Mecanístico desenvolvido na COPPE/UFRJ com base no programa FEPAVE2.

Esta dissertação contém cinco capítulos, sendo o primeiro a presente introdução, e os seguintes:

- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: conceitos fundamentais da estabilização de solos, ressaltando a estabilização química de solos; características principais das emulsões asfálticas; relato de estudos realizados com solo-emulsão e breve comentário sobre o dimensionamento, destacando-se o mecanístico, que envolve o módulo de resiliência e o programa FEPAVE.
- Capítulo 3 – Materiais e métodos: caracterização dos materiais utilizados, detalhamento dos procedimentos de mistura e métodos de ensaio dos solos puros e dos solos estabilizados com emulsões.
- Capítulo 4 – Neste capítulo, apresentam-se os resultados e as análises dos ensaios realizados em laboratório e, também, a comparação com os resultados obtidos por MICELI (2006). Além disso, são descritas as hipóteses utilizadas para o dimensionamento mecanístico e os resultados que este dimensionamento proporcionou.
- Capítulo 5 – Conclusões e sugestões de pesquisas futuras.

Apresentam-se ainda seis anexos com os principais resultados de laboratório e com as análises mecanísticas realizadas.

CAPITULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica abrange os seguintes tópicos:

- Conceitos fundamentais sobre estabilização de solos e características principais dos tipos de estabilização mais utilizados na construção de pavimentos rodoviários, ressaltando a estabilização química de solos;
- O estudo do solo-emulsão, as características das emulsões asfálticas e uma resenha dos principais trabalhos, teses e pesquisas de solo asfalto a que se pode ter acesso.
- Dimensionamento de pavimentos com o enfoque mecanístico: o módulo de resiliência e o programa FEPAVE2.

2.1 Estabilização de solos

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

- Evitar ou contornar o terreno mau;
- Remover o solo ruim e substituí-lo por outro de qualidade superior;
- Projetar a obra para situação de terreno de fundação má (conviver com a situação difícil);
- Estabilizar o solo existente.

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

A estabilização de um solo pode ser definida como sendo a alteração de qualquer uma de suas propriedades, de forma a melhorar seu comportamento sob o ponto de vista da engenharia. Consiste em um tratamento artificial, por um processo físico, químico ou

físico-químico, tornando o solo estável para os limites de sua utilização, e ainda fazendo com que a estabilização permaneça sob a ação de cargas exteriores e também sob ações climáticas variáveis.

As propriedades de engenharia que se visa modificar na estabilização de um solo, MEDINA e MOTTA (2004), são:

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

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

Com respeito ao solo, as seguintes propriedades devem ser consideradas de modo a escolher o melhor método de estabilização (KÉZDI, 1974):

- Propriedades do solo em condição natural;
- Propriedades esperadas do solo estabilizado;
- Efeitos no solo estabilizado depois da estabilização.

Devido à grande variabilidade de solos, nenhum método se aplica generiamente em todos os solos, cada um sendo mais adequado para um certo tipo de solo. Não obstante, a estabilização não só deveria ser pensada em termos de tratamento corretivo mas também como uma medida preventiva ou de segurança contra condições adversas que se desenvolvem no curso da construção ou ao longo da vida da estrutura (INGLES e METCALF,1972)

2.1.1. Estabilização Mecânica

Considera-se a estabilização mecânica a simples compactação dos solos até a estabilização granulométrica dos mesmos.

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

Esta densificação é utilizada em todas as camadas do pavimento, sejam estas estabilizadas por outro processo ou não e é realizada por meio de equipamento mecânico, geralmente um rolo compactador, embora, em alguns casos, como em pequenas valetas, até soquetes manuais possam ser empregados (PINTO, 2002).
Por outro lado, a estabilização mecânica por correção granulométrica engloba as melhorias induzidas em um solo pela mistura deste com outro ou outros solos que possibilitem a obtenção de um novo produto com propriedades adequadas para determinados fins de engenharia (SANTOS *et al.,* 1995).

Na estabilização granulométrica procura-se obster um material densamente graduado e de fração fina plástica limitada, com a mistura íntima de dois ou mais solos e sua posterior compactação.

É possível encontrar materiais naturais que podem ser utilizados sem mistura ou adição, e junto com os provenientes de misturas, comparam-se às especificações de materiais para base ou sub-base que recebem o nome de “base (ou sub-base) estabilizada granulometricamente” (MEDINA e MOTTA, 2004).

Os procedimentos analíticos aproximados para a dosagem da mistura vêm em CAPUTO (1977):

- Processo algébrico: consiste de um sistema de equações com as porcentagens do agregado grosso, fino e fíler de materiais diferentes e se admitem, de acordo com as especificações, porcentagens desejadas para a mistura. Obtêm-se então as proporções em que os materiais componentes entram na mistura;

- Processo do triângulo: consiste em locar os pontos representativos dos solos a misturar num triângulo eqüilátero e o ponto correspondente ao material que se deseja obter. Unem-se os pontos dos materiais disponíveis e tem-se as proporções a serem tomadas;

- Construção gráfica de Rothfuchs: baseia-se na hipótese de que a curva granulométrica desejada é representada pela diagonal de um retângulo em que um dos lados é graduado em porcentagem, numa escala linear de 0 a 100. A partir desta escala e da diagonal define-se a escala horizontal, relativa aos diâmetros e que é uma escala proporcional. Sobre este diagrama traçam-se as curvas granulométricas dos materiais substituindo-as, em seguida, por segmentos de retas tais que as áreas por eles compreendidas com as curvas primitivas, sejam compensadas e mínimas

em valor absoluto. As extremidades opostas destes segmentos são ligadas, duas a duas, por segmentos, os quais interceptam a curva granulométrica diagonal em pontos que, finalmente, determinarão as porções de cada material na mistura desejada;

Estes procedimentos são indicativos da dosagem, que deve ser confirmada experimentalmente.

Na prática é usual utilizar-se um procedimento comumente designado "método das tentativas" que consiste na mistura íntima de diferentes proporções de materiais disponíveis até obter-se uma mistura que atinja as exigências do projeto.

2.1.2. Outros processos de estabilização física

A estabilização física mais comumente empregada em pavimentação é a descrita no item anterior, como parte da estabilização mecânica, que consiste na modificação das propriedades do solo atuando na textura, seja, misturando solos com diferentes frações granulométricas. Outras técnicas envolvem tratamentos térmicos de secagem ou congelamento, tratamento elétrico e eletro-osmose, que melhoram as características estruturais e de drenagem dos solos (OLIVEIRA[3] apud MACÊDO, 2004).

O tratamento térmico de secagem é citado por INGLES e METCALF (1972) em estradas de terra na Índia; na verdade procedem à queima do solo no local.

Atualmente o emprego da calcinação de argila para gerar agregados para uso em locais onde não se tem agregados naturais como na Amazônia pode ser considerada uma forma de estabilização física, onde o uso de calor intenso por queima controlada também provoca alguma alteração nos minerais argílicos presentes no solo (NASCIMENTO, 2005; CABRAL, 2005).

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

CRISTELO (2001) comenta o tratamento por aquecimento consistindo na introdução no solo de um tubo perfurado pelo qual se injeta uma mistura comprimida de ar muito

[3] OLIVEIRA, L. C., *A Estabilização de Solos Aplicada A Habitação, Um Estudo de Misturas Solo-Cimento*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1994.

quente e combustível. O aquecimento pode ser obtido por queima de combustíveis ou por processos elétricos. Outro processo térmico, por resfriamento provoca a estabilização por congelamento artificial da água intersticial originando um material rígido com elevada resistência. Nenhum destes processos no entanto tem tido aplicação na pavimentação.

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

2.1.3. Estabilização Química

A estabilização química consiste na adição de uma determinada substância química ao solo, de modo a provocar mudanças que venham a influenciar as propriedades de resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade deste, atingindo-se, então o objetivo de estabilizá-lo (SANTOS *et al,* 1995).

Na estabilização química, como o nome indica, há uma reação química do aditivo com os minerais do solo (fração coloidal) ou a constituição de recheio dos poros pelo produto de reação química do aditivo com a água. No solo-cimento e solo – cal existe, inicialmente, uma reação que se caracteriza melhor como físico- química: os cátions Ca++ liberados pela hidratação do cimento reagem com a superfície dos argilo-minerais e modificam o pH da solução eletrolítica. Os produtos cimentantes que se formam posteriormente (diz-se reação pozolânica) acrescem a rigidez da mistura (MEDINA,1987).

Segundo MEDINA (1987) quando se forma a mistura solo-estabilizador pode ocorrer que o estabilizador forme ou não uma matriz contínua com o solo. Na matriz contínua o agente estabilizador preenche todos os poros e as partículas de solo ficam nela mergulhadas como se fossem um inerte de enchimento. Neste caso as propriedades do sistema são essencialmente as da matriz e as propriedades mecânicas do estabilizador predominam. Tem-se várias reações resultantes da mistura soloestabilizador: reações físicas - variação de temperatura, hidratação, evaporação e adsorção e reações químicas - troca catiônica, precipitação, polimerização, oxidação, solução e carbonatação.

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

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

Algumas características sobre os tipos de estabilização química são descritos a seguir:

Solo-Cimento

A estabilização solo-cimento processa-se a partir da hidratação do cimento dentro dos vazios do solo, atuando o cimento como o principal agente. LIMA et al (1993) lembram que busca-se, com a adição do cimento, desenvolver uma estrutura capaz de minimizar a sensibilidade às mudanças de umidade, e que possam gerar esforços de tração e compressão significativos no interior da massa de solo.

Pode-se dividir a estabilização pelo cimento em categorias (MEDINA, 1987):

- Solo-cimento: é um material endurecido pela cura de uma mistura íntima compactada mecanicamente de solo pulverizado, cimento portland e água, sendo esse endurecimento avaliado por critérios de durabilidade e resistência à compressão simples de corpos de prova. Normalmente é utilizado como base ou sub-base;
- Solo modificado ou melhorado: é um material não endurecido ou semi-endurecido que é julgado pela alteração dos índices físicos e ou capacidade de suporte do solo. Utiliza-se um teor baixo de cimento que não deve ser maior que 5%. Pode ser utilizado como base, sub-base ou subleito;
- Solo-cimento plástico: difere do solo cimento definido antes por ser utilizada uma quantidade maior de água durante a mistura de forma a produzir uma consistência de argamassa na ocasião da colocação. É utilizado para revestimento de valas, canais e taludes.

Existem dois métodos de dosagem para solo-cimento: O primeiro estabelecido pela ABNT e o segundo chamado método físico-químico, desenvolvido na COPPE pelo Prof. Casanova. Ambos os métodos encontram-se descritos por exemplo em MACÊDO (2004).

Solo-Cal

As reações entre o solo e a cal podem ser (MEDINA, 1987):

- Rápida ou imediata: floculação e permuta iônica;

- Reações lentas: reação pozolânica, carbonatação e formação de novos compostos cristalinos.

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

- Distribuição granulométrica: há um aumento do tamanho dos grãos, tanto mais acentuada quanto mais fino o solo natural. A agregação pode se desfazer em parte quando se embebe o solo-cal na água, porém muitos agregados tornam-se hidrofóbicos;
- Plasticidade: o LP cresce com o uso da cal e o LL tende a diminuir. O aumento do teor de cal acarreta valores de IP cada vez menores. O IP varia com o tempo de reação;
- Variação de volume: o tratamento de um solo expansivo com cal reduz as variações de volume do solo quando este absorve água;
- Compactação: a densidade diminui e o teor de umidade ótima aumenta quando se trata um solo com cal.
- Resistência: a resistência à compressão simples é o ensaio mais comumente utilizado.

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

Solo-Polímero

A atuação de polímeros de origem natural ou artificial como estabilizantes dos solos, baseia-se na capacidade destes repelirem a água, definida como propriedade hidrófoba, e de gerarem coesão por meio de polimerização.

Considerando o caráter iônico dos polímeros, eles podem ser aniônicos, atuando no sentido de promoverem a dispersão dos solos; neutros, caso em que não influenciam nas condições de floculação ou dispersão dos solos; e catiônicos, atuando no sentido de promoverem a floculação dos solos. Sabe-se também que os materiais orgânicos poliméricos mostram-se, em geral, eficientes quando aplicados na estabilização de solos ácidos (INGLES e METCALF, 1973).

A partir desta constatação, obviamente, a acidez dos solos tropicais poderia consistir em um fator técnico favorável ao emprego desta solução, mas o seu emprego tem-se

mostrado economicamente discutível, mesmo em países de grande desenvolvimento tecnológico.

Solo-Ácido fosfórico

A estabilização de solos com ácido fosfórico pode ser compreendida como aquela que ocorre a partir de reações químicas deste ácido com os elementos do solo, com a formação de fosfatos de ferro ou de alumínio, que se mostram como compostos duros e insolúveis (MEDINA, 1987). O ácido fosfórico em particular é extremamente reativo (reação exotérmica intensa) com os solos tropicais que tenham óxidos de ferro e de alumínio livres. Este tema é tratado na tese de GUIDA (1971) e relatado em um trabalho expandido e aprofundado por MEDINA e GUIDA (1995).

RICO e DEL CASTILHO[4] apud ALCÂNTARA et al (1995) consideram, também, que o ácido fosfórico auxilia grandemente nas condições de compactação, e que os solos ricos em caolinita, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio são os mais favoráveis ao processo.

Dado o fato de que a estabilização se processa por ação química do aditivo sobre os minerais do solo, os solos finos são os mais adequados para a estabilização. Do ponto de vista de acidez, os solos ácidos são favoráveis, no sentido de não se neutralizar a ação do ácido fosfórico.

Os aspectos de mineralogia e acidez diferenciam os solos tropicais daqueles de regiões temperadas para o uso do aditivo. Segundo ALCÂNTARA et al (1995), a princípio estas diferenças sugerem um bom desempenho para o ácido fosfórico quando aplicado nas regiões tropicais, contudo, o custo do aditivo para algumas destas regiões pode inviabilizar a sua utilização, tendo em vista o tipo de jazidas predominantes e o custo do beneficiamento.

Solo-Hidróxido de Sódio

A estabilização de solos com Hidróxido de Sódio mostra-se promissor para o uso em regiões tropicais, em decorrência de uma mineralogia favorável. ALCÂNTARA et al (1995) relatam que baixos teores do aditivo podem ser eficientes para a estabilização do solo, entretanto, destaca-se que a sua utilização requer cuidados especiais com relação

[4] RICO, A., DEL CASTILLO H., *La ingeniería de suelos en las vias terrestres.* Mexico, Editorial Limusa, Vol.2, 643p, 1977.

ao seu manuseio, e consequentemente, com a segurança do usuário, o que pode incidir em custos de operação elevados.

Solo-Cloreto

O uso de sais como agente estabilizador de solos na área de estradas têm a sua importância, em geral, associada às necessidades de se prevenir os efeitos deletérios do frio excessivo, reter a umidade do solo e reduzir o pó. Dentre os principais tipos de sais utilizados tem-se o cloreto de cálcio, cloreto de magnésio e o cloreto de sódio que teve maior disseminação no meio rodoviário (THORNBURN e MURA[5] apud ALCÂNTARA et al, 1995).

As características do tratamento com cloretos, segundo MEDINA e MOTTA (2004) são as seguintes.

Cloreto de cálcio:

- Permanência da umidade e aumento da massa específica durante a compactação;
- Tensão superficial aumentada provoca aumento da massa específica durante a cura;
- Os íons Ca^{++} podem melhorar as propriedades da argila tipo montmorilonita;
- Redução do ponto de congelamento;
- Aplica-se somente a solos granulares bem graduados;
- Efeito corrosivo e lixiviação

Cloreto de Sódio:

- Melhora a retenção de água e aumenta o peso específico durante a compactação;
- Reduz o ponto de congelamento;
- Pode causar cimentação se existir $CaCO_3$;
- Aplica-se somente a solos granulares bem graduados;
- Lixiviação pela chuva;
- Pode provocar superfície mais escorregadia;

2.2 Solo-Asfalto

SANTANA (1971) relata aplicações de solo - asfalto para construção de segmentos no nordeste na década de 1960, cuja técnica proposta por ele foi de escarificar 4cm no topo da camada de revestimento primário, misturar com emulsão asfáltica, compactar e logo

[5] THORNBURN, T.H., MURA, R., *Stabilization of soils with inorganic salts and bases: review of the literature.* Washington, D. C., Highway Research Record, Bulletin N°294, 22p., 1969.

após executar uma capa selante com espalhamento de emulsão e areia. A emulsão utilizada nos segmentos realizados pelo autor foi do tipo ruptura lenta (RL) para o solo escarificado e na capa selante foi usada emulsão de ruptura rápida (RR). A construção de mais de 200km de estabilização asfáltica de solo com este procedimento resultou em relativo sucesso, e SANTANA (1978) concluiu que era difícil escarificar somente 4 cm, ficando a maioria dos trechos com 6cm de espessura estabilizada com asfalto, era necessário umedecer o solo acima da umidade ótima para facilitar a escarificação e o espalhamento da emulsão, que era diluída (1:1).

CHAVES (2007) relata que no Estado do Ceará, através do DAER (atual DERT), foi implantado no período de 1981 a 1984, através do programa III BBD (BIRD-BNDES-DNER) o projeto denominado Jaguaribe. Este programa beneficiava vários municípios do vale do rio Jaguaribe onde foram construídos pavimentos revestidos com solo-betume numa extensão aproximada de 200 km, onde o tráfego era enquadrado como baixo volume. E fora do projeto Jaguaribe foram construídos cerca de 150 km de rodovias com o revestimento em solo-betume e espessuras variáveis com o volume de tráfego.

Na figura 2.1 está mostrada uma seção tipo do pavimento com revestimento em solo-betume adotado no Ceará na década de 1980. Em alguns trechos em revestimento primário, ainda se encontram vestígios de antigas camadas de tratamento contra pó (figura 2.2). Por falta de manutenção surgem uma grande quantidade de panelas e os distritos operacionais fazem a remoção do revestimento para melhorar as condições de rolamento do tráfego. Na figura 2.3 mostra-se uma amostra de solo-betume coletada por CHAVES (2007) quando da demolição de um segmento, em 1989, para reconstrução do trecho Belém (BR-304) – Icapuí com revestimento em CBUQ.

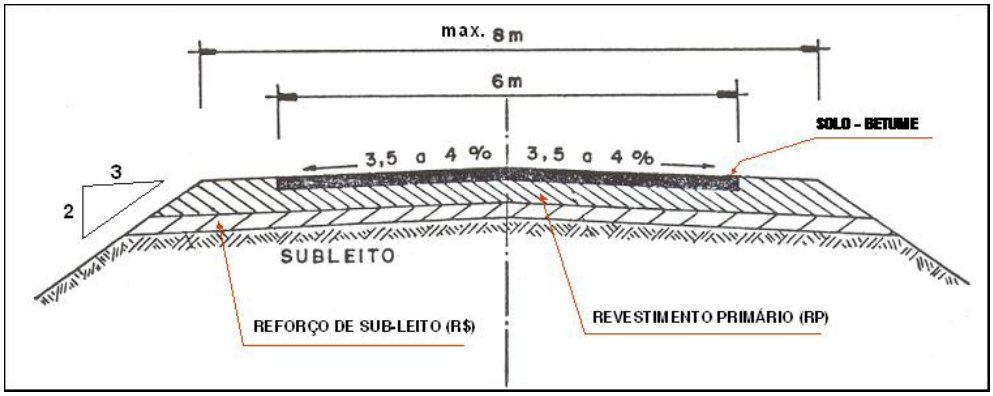


Figura 2.1 – Seção tipo de revestimento primário com estabilização betuminosa usada no Ceará (CHAVES , 2007).

Figura 2.2 – Trechos de rodovias do Ceará em revestimento primário apresentando resquícios de solo-betume, vista geral e detalhe (CHAVES, 2007)

Figura 2.3 - Amostra de solo-betume do trecho Belém – Icapuí (Ceará), removido em 1989 (CHAVES, 2007)

THULER (2005) relata experiência realizada no estado do Rio de Janeiro na década de 1970 com implantação de alguns segmentos de solo–emulsão em rodovias estaduais. Na Figura 2.4 apresentam-se algumas fotos de um destes trechos, obtidas pelo citado autor cerca de 20 anos após a construção. Esta mistura de solo–emulsão foi feita na pista e compactada após um certo tempo de estocagem em leiras no local. Não se

prosseguiu com esta técnica no estado do Rio de Janeiro após estas primeiras experiências, e não foi possível saber quantos quilômetros foram construídos, mas cabe ressaltar que o pavimento construído com esta técnica foi um sucesso.

Figura 2.4 – Trecho antigo de solo –emulsão na RJ 148 no estado do Rio de Janeiro cerca de 20 anos após construção (THULER, 2005)

ALCÂNTARA (1995) relata que a estabilização dos solos com asfalto compreende a utilização de produtos asfálticos procedentes da destilação e refinamento do petróleo bruto ou asfaltos naturais; e, resíduos da destilação destrutiva de materiais orgânicos – alcatrão, hoje em desuso. A forma mais comum de incorporação destes aos solos é na forma de emulsão ou diluídos com um solvente apropriado.

CASTRO (2003) comenta que a emulsão asfáltica se tornou uma excelente alternativa para a pavimentação urbana e rural dadas as suas características de manuseio a temperatura ambiente e a versatilidade com que pode ser utilizada na produção de materiais básicos para a camada de rolamento, revestimento impermeabilizante, rejuvenescimento de estrutura de pavimento, camada intermediária em revestimentos asfálticos espessos e pintura de ligação, associados à facilidade de armazenamento.

2.2.1. As emulsões asfálticas

A emulsão asfáltica é definida como sendo uma mistura heterogênea de dois ou mais líquidos, que normalmente não se dissolvem um no outro, mas quando são mantidos em suspensão por agitação ou, mais freqüentemente, por pequenas quantidades conhecidas por emulsificantes formando uma mistura estável (ABEDA, 2001).

No processo de emulsificação, é necessário que se promova a quebra do cimento asfáltico do petróleo (CAP) em partículas micrométricas e que o mesmo fique disperso no meio aquoso. Para promover o cisalhamento do CAP é aplicada energia térmica e mecânica, através de um moinho coloidal, obtendo-se emulsão de asfalto em água bem homogênea.

Utiliza-se da ordem de 33 a 42% de água juntamente com agentes emulsificantes (0,2 a 1,0%) para que a mistura possa ter estabilidade ao bombeamento, transporte e armazenamento em temperatura ambiente (CASTRO, 2003).

Algumas definições ligadas ao emprego das emulsões asfálticas (VOGT, 1971; ABEDA, 2001; MICELI, 2006) são:

- Aglutinação/adesividade: aptidão do ligante residual para aderir e ficar fixo sobre o agregado que ele recobre, sem perigo de desrevestimento. A ruptura não implica necessariamente na adesividade do ligante residual; uma película de asfalto pode revestir uma pedra sem verdadeira adesividade às vezes em conseqüência da presença de uma película de água intercalada (caso das emulsões aniônicas). Distingue-se a adesividade ativa e a adesividade passiva. A primeira é a propriedade de um ligante asfáltico deslocar a película de água de um agregado molhado, e a adesividade passiva é a propriedade de um ligante asfáltico, que revestiu um agregado seco, resistir à ação da água;
- Cura: transformação química, física ou físico-química de uma emulsão usada numa camada de base ou de revestimento, que as tornam aptas a suportarem o trânsito. A cura de um revestimento à base de emulsão estará completa quando a emulsão estiver completamente rompida (caso das emulsões catiônicas). O fenômeno de cura ocorre como conseqüência de absorção e evaporação da água e solventes (emulsões, asfalto diluído);
- Ruptura: denomina-se ruptura, ou quebra de uma emulsão, o fenômeno da separação das fases constituintes da emulsão. A ruptura pode ocorrer por evaporação d'água, por um desequilíbrio eletroquímico (provocado por aumento da acidez ou alcalinidade) ou pela ação do agregado, o qual atrai para si os glóbulos de asfalto (ABEDA,2001);
- Velocidade de Ruptura: velocidade em que se efetua a separação das fases de uma emulsão em presença de um agregado.

  Distinguem-se as emulsões de ruptura rápida (RR), as emulsões de ruptura média (RM) e as emulsões de ruptura lenta (RL). Em pavimentos, segundo a velocidade de ruptura da emulsão, sugere-se o uso de emulsões do tipo RR para pinturas de

ligação, as do tipo RM para misturas com agregados graúdos e as do tipo RL para misturas com agregados miúdos (MICELI, 2006).

A velocidade de ruptura depende:

- da composição e quantidade do emulsificante;
- da natureza mineralógica da pedra (pedras mais ou menos reativas);
- da superfície específica das pedras: uma emulsão terá uma velocidade de ruptura maior sobre uma pedra de 2-5mm que sobre uma pedra 12,5-25mm de mesma natureza mineralógica (proveniente de uma mesma pedreira).

- Ligante Residual: ligante total depositado após ruptura (separação das fases) de uma emulsão, sendo constituído por cimento asfáltico do petróleo (CAP).

As emulsões asfalticas, dependendo do tipo de emulsificante, são carregadas eletricamente e são classificadas em não iônicas, quando os glóbulos de asfalto são neutros; aniônicas, se os glóbulos de asfalto são carregados eletronegativamente ou catiônicas, se os glóbulos de asfalto são carregados eletropositivamente.

Dependendo da quantidade de cimento asfáltico envolvido na fabricação das emulsões, elas podem se classificar em 1C e 2C, onde a letra C indica emulsão do tipo catiônica e os números 1 e 2 estão associados à viscosidade relativa e quantidade de cimento asfáltico empregado na fabricação.

Segundo, ABEDA (2001), as principais vantagens das emulsões asfálticas são:

- Representam uma alternativa para economia de energia, uma vez que, na maioria dos casos, pode ser empregada sem necessidade de aquecimento;
- Apresentam excelente afinidade com todos os tipos de agregados eliminando o uso de aditivos “dopes”, normalmente empregados para melhorar a adesividade do cimento asfáltico de petróleo (CAP) com agregados em misturas à quente;
- Possibilitam a utilização de agregados úmidos evitando a necessidade de combustíveis para secagem dos mesmos;
- Permitem estocagem a temperatura ambiente em instalações simples que não requerem fonte de aquecimento, combustíveis derivados de petróleo e isolamento térmico;
- Eliminam os riscos de incêndio e explosões, uma vez que não são utilizados solventes de petróleo em seu emprego;
- Evitam os riscos de acidentes por queimaduras;
- Não geram vapores tóxicos e poluentes preservando o meio ambiente;

- Possibilitam a produção de grandes volumes de misturas em equipamentos de baixo custo e de fácil operação/distribuição.

2.2.2. Estabilização de solos com emulsões asfálticas

A eficiência da mistura do betume com o solo pode conduzir a vários efeitos, entre os mais importantes, segundo Kézdi (1979), tem-se:

- 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;
- Conversão de solos que possuem só resistência ao atrito em solos coesivos e impermeáveis.

Ao misturar as partículas do solo, água e asfalto, processos físicos e químicos bastante complexos são iniciados. No caso de solos granulares, o objetivo é cobrir individualmente os grãos com um filme de asfalto suficientemente fino para não reduzir muito o atrito produzido quando as partículas são deslocadas, mas suficientemente grosso para permitir coesividade entre os grãos (KÉZDI, 1979).

A adição de asfalto ao solo pode afetar suas propriedades em dois sentidos: impermeabilizando e/ou aumentando a força de coesão do solo. Esta força alcança um valor máximo à medida que aumenta o teor de betume, mas depois esta força vai decrescendo à medida que o filme de betume vai se tornando mais espesso. Porém quanto maior o conteúdo de betume, melhor a impermeabilização do solo, assim, é usual buscar um equilíbrio entre a máxima força coesiva e a maior impermeabilização (INGLES e METCALF, 1972).

O processo de estabilização de solo emulsão é influenciado pelos elementos componentes da mistura e pelo processo utilizado para a realização da mistura. Entre eles podem ser citados:

- ***Tipo de solo***

Quanto as características dos solos SILVA[6] apud PESSOA (2004) refere-se a três modalidades de estabilização comumente empregadas:

[6] SILVA, D.P., *Estudo do comportamento reológico de solos estabilizados com cimento: processos gerais de estabilização.* Lisboa, Relatório final, Processo 52/8/3048, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 343p., 1968.

- Areia-Betume: é a mais difundida, pela facilidade com que se pode controlar a qualidade da mistura, podendo ser competitiva em comparação a outros processos de estabilização química. Como característica do processo, observa-se que o material que passa na peneira n°200 deve estar na faixa de 5 a 12%, o índice de plasticidade ser inferior a 10%, desta forma tenta-se gerar com o betume forças de natureza coesiva no solo;
- Solo-Betume: agrupa as misturas dos materiais asfálticos com solos argilo-siltosos e argilo-arenosos. Enquanto na areia-asfalto busca-se gerar forças de natureza coesiva ao solo, no solo-betume, que já contém esta parcela, o que se busca é garantir a constância do teor de umidade da mistura após a compactação. Trata-se de uma ação impermeabilizante, realizada pela prevenção de possível ascensão capilar da água, bem como pela criação de películas hidrorrepelentes que, envolvendo as partículas do solo, impedem o acesso da àgua exterior na mistura;
- Pedregulho-Betume: o objetivo principal desta estabilização é gerar um efeito coesivo entre as partículas grossas sem interferir na coesão natural existente na fração fina do solo. Como características tem-se que o material que passa na peneira n°200 deve ser inferior a 12% e o índice de plasticidade, inferior a 10%.

INGLES e METCALF (1972) mencionam que a gradação dos solos não é restritiva, mas que geralmente o solo deve ter mais de 50% passando na peneira 3/16 polegadas com 10-50% passando na peneira N°200; o LL< 40% e o IP< 18. Porém, solos com mais de 75% passando na peneira N°200 e LL maior do que 50, foram tratados satisfatoriamente à época da referência citada.

Outros autores, como é mostrado na Tabela 2.1 (MICELI, 2006), definem certas restrições quanto ao às características granulométricas e os índices de plasticidade dos solos a serem empregados:

Tabela 2.1 – Requisitos de solos a serem estabilizados com asfalto (MICELI, 2006)

TIPO DE SOLO	LL/LP DO SOLO	%PASSANTE #0,075mm	FONTE
Areias	IP máximo de 12%	25% máximo	YODER e WITCZAK (1975)
Pedregulhos e areias pedregulhosas	IP máximo de 12%	15% máximo	
Solos finos	IP máximo de 18%; LL máximo de 40%	35% máximo	
Solos em geral	IP máximo de 18%; LL máximo de 40%	Entre 10 e 50%	KÉZDI (1979)
Solos em geral	IP máximo de 14%	5% mínimo	VOGT (1971)
Solos Arenosos		35% máximo	DER 3.07 (1988)
Solos Argilosos	IP máximo de 6%; LL máximo de 30%	35% máximo	
Materiais Britados		15% máximo	ABEDA (2001)
Solos em geral	IP máximo de 8%	20% máximo	
Solos em geral		25% máximo	ASTM (2006)

- ***Teor de água***

Segundo VOGT (1971), existem 3 teores de água críticos:

a. O teor de água de dispersão, existe um 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%. O solo deverá ser pois, antes de mais nada umedecido.
b. O teor de água de diluição, necessária pelas emulsões serem muito viscosas e também porque as emulsões diluídas rompem-se mais lentamente, o que facilita a dispersão na massa do solo.
c. O teor de água de compactação, o teor Proctor a ser considerado corresponde ao fluido total: soma do asfalto sob forma de emulsão e de água

É 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).

FERREIRA (1980) recomenda a adição e homogeneização prévia de água ao solo, para posterior adição do material asfáltico. Segundo ele esta adição impede a ruptura

prematura das emulsões, facilitando o processo de mistura. LUCENA et al (1982) diluíram a emulsão em parte da água a ser adicionada ao solo (na proporção de 1:1), sendo o restante da água a ser adicionada misturada ao solo antes da emulsão diluída.

Segundo YODER e WITCZAK (1975) a quantidade de água necessária para estabilizar um solo com material betuminoso é, em geral, menor do que o teor ótimo obtido nos ensaios de compactação na energia Proctor Normal para o solo natural. No entanto, os estudos realizados por FERREIRA (1980) e LUCENA et al (1982), verificou-se que a máxima tensão de ruptura era obtida para corpos-de-prova com umidades próximas da umidade ótima. Nos dois estudos foram utilizados diversos teores de umidade para cada teor de betume e realizados ensaios de compressão simples e de tração indireta.

- ***Teor e tipo de emulsão asfáltica***

Se a emulsão rompe muito rápido, isso impede que a penetração seja alcançada e é por isto que as emulsões de ruptura rápida não sejam usadas já que rompem no contato com o solo (INGLES e METCALF, 1972).

- ***Tempo de aeração***

O termo “aeração” se refere ao tempo de descanso em que a mistura solo-emulsão é deixada ao ar antes da compactação, com a finalidade de possibilitar a ruptura da emulsão asfáltica. Segundo INGLES e METCALF (1972), a aeração antes da compactação aumenta a estabilidade e diminui a absorção de água, particularmente em solos de granulação fina, havendo um período de aeração ótimo. A estabilidade máxima que pode ser atingida para uma mistura em particular depende do período e temperatura de aeração.

- ***Cura dos Corpos-de-prova***

Na estabilização de solos com betume, se não houver secagem não há estabilização (MATTOS, 1991).

No trabalho apresentado por JACINTHO (2005), comenta-se de que a cura é uma etapa necessária em trabalhos de estabilização betuminosa, pois é durante esta fase que o teor de água é reduzido, facilitando a cobertura da superfície mineral com o asfalto base. Este autor considera que a máxima perda de água, durante a cura, é mais importante para a durabilidade da mistura do que a obtenção da massa específica aparente seca na compactação.

2.2.3. Pesquisas realizadas com solo-emulsão

LUCENA et al (1982)

A pesquisa descreve a estabilização de 4 solos lateríticos dos estados do Piauí e do Maranhão. A definição das jazidas de onde foram coletados estes solos é detalhada no trabalho apresentado por eles.

Estes solos utilizados tinham umidades ótimas e massas específicas aparentes secas máximas, variando entre 10 a 15 % e de 1,8 a 2 t/m^3, respectivamente. Foram realizados ensaios de compactação, resistência à compressão simples e resistência à tração direta usando teores de 0 a 8% de emulsão catiônica. Os corpos de prova foram compactados pelo Proctor Normal em moldes de 10cm de diâmetro e a altura variando entre 13 e 20cm. O tempo de cura dos corpos de prova fori ao ar livre, sem imersão.

O trabalho concluiu na importância da umidade de moldagem nos solos lateríticos, eles apresentaram uma variação da umidade ótima respeito à do solo natural inferior a 2% e Verificou-se também,que a adição de 2% de emulsão provocou no sistema um maior aumento da massa específica aparente seca e da resistência à compressão simples.

ARAÚJO et al (1983)

Eles selecionaram 5 solos lateríticos do estado de Paraíba, que tinham entre 18 e 27% de material passante na peneira N°200. A estes solos foram adicionados teores de 0, 2 e 4% de emulsão asfáltica do tipo RM-1C com quatro teores de umidade para cada teor de emulsão e moldaram se 3 corpos-de-prova para cada teor de emulsão.

Depois de moldados, os corpos-de-prova foram deixados durante 7 dias em cura ao ar livre e finalmente foram realizados os ensaios triaxiais.

Os resultados obtidos indicam que existe uma diminuição do ângulo de atrito interno e o índice de vazios quando se adiciona emulsão aos solos estudados. Também se verifica um aumento da coesão nas misturas de solo-emulsão ao se adicionar valores entre 0 e 4% de emulsão.

Outra observação foi que ao se adicionar emulsão ao solo, as tensões de ruptura, de modo geral para os solos estudados, apresentaram picos máximos para o teor igual a 2% de emulsão RM-1C.

MOMM (1983)

O objetivo do autor foi de estabilizar um solo com emulsão asfáltica e avaliar sua melhoria em ensaios de resistência à compressão simples, moldando corpos de prova com energia equivalente a do Proctor modificado.

Utilizou-se um solo da região de Santa Catarina com 14% de material passante na peneira N°200 e se adicionou a ele percentagens entre 0 e 4% de emulsão. Depois de misturada a emulsão ao solo, foram moldados 5 corpos de prova para cada teor de emulsão com teores de umidade variando entre 16 e 24%. O tempo de cura antes do ensaio foi de 7 dias ao ar; o ensaio foi realizado numa prensa manual e os valores anotados foram a carga aplicada e a deformação necessária para levar o corpo-de-prova à ruptura.

As conclusões desta pesquisa foram:

- A resistência à compressão simples aumenta significativamente até um teor ótimo de emulsão.
- Neste caso, a emulsão propicia um aumento da densidade para um teor de emulsão de 2% e a partir deste teor vai decrescendo
- A adição de emulsão não altera significativamente a umidade ótima de compactação, a variação desta umidade esta em torno de $\pm$ 1% em torno da umidade ótima do solo natural.
- Já na resistência à compressão simples, a adição de emulsão altera significativamente a umidade ótima.
- O teor de emulsão que resulto na máxima densidade, não foi o mesmo que propicio a máxima resistência à compressão simples.
- E por ultimo o teor de emulsão com o qual se tinha a maior densidade foi o mesmo com o qual se obteve a deformação máxima.

GUARÇONI et al (1988)

Este trabalho apresenta o estudo teórico do sistema solo-asfalto. Os ensaios realizados com misturas de solos arenosos e argilosos para a validação deste estudo foram: o ensaio de compactação, ensaios de PH do solo e o ensaio de índice de suporte Califórnia (mini-CBR)

As variáveis dos corpos-de-prova ensaiados foram: as umidades de moldagem – a umidade ótima e 60% da umidade ótima, o tempo de cura – de 7 dias ao ar livre e 24 horas em estufa a 60ºC, com teores de emulsão variando entre 2 e 15%. Propôs-se ao

final do estudo uma forma de dosagem de misturas solo-emulsão baseada no ensaio de Mini-CBR.

A descrição da gênese e da constituição mineralógica dos solos ensaiados encontra-se amplamente detalhada na pesquisa realizada pelos referidos autores.

MATTOS et al (1991)

Nesta pesquisa moldaram-se corpos-de-prova com teores de emulsões RM-1C e RL-1C entre 0 e 10%, para a realização de ensaios de CBR e mini-CBR.

A programação de ensaios consistiu na moldagem de corpos-de-prova na umidade ótima e com 60% da umidade ótima, imergidos após compactação e com 7 de cura ao ar antes da imersão. Também foram moldados corpos-de-prova, deixados secar em estufa a 60ºC e depois imergidos durante 6 horas (no caso de solos arenosos) e 24 horas (no caso de solos argilosos). Estas variações foram realizadas para as condições de massa específica constante e para energia constante.

Chegou-se conclusão de que somente os solos arenosos são economicamente estabilizáveis com emulsões asfálticas e que devem ser utilizadas emulsões asfálticas de ruptura lenta preferencialmente. Quanto ao teor de fluidos, conclui-se que deve ser aproximadamente um 60% do valor da umidade ótima.

CARVALHO et al (1992)

Estudaram a possibilidade de utilizar o ensaio de durabilidade usado para misturas de solo-cimento, em misturas de solo-emulsão e verificaram a resistência mecânica da mistura.

Realizaram ensaios de compactação para encontrar a massa específica seca máxima e a umidade ótima da mistura; com esta umidade misturaram um solo predominantemente arenoso com teores diferentes de emulsão (tipo RL-1C) e tempos de cura antes da compactação variando em intervalos de 1, 2, 3 e 4 horas. Moldaram 6 corpos-de-prova por traço, sendo 3 ensaiados após a compactação e os outros 3 ensaiados após cura em estufa a uma temperatura de 40°C. Quanto ao ensaio de durabilidade, foi adicionado ao solo 8% de emulsão RL-1C e a mistura ficou exposta a temperatura ambiente durante intervalos de 2, 4 e 6 horas, em bandejas. Após disso, compactaram-se os corpos-de-prova e foram submetidos a períodos de imersão, secagem, exposição e escovação

durante 12 ciclos correspondendo cada ciclo, a 24 horas das operações citadas.Chegaram às conclusões seguintes:

- Quanto à resistência a compressão simples, houve um ganho significativo para o tipo de solo estudado (20% de material passante na peneira N° 200) com 5% de emulsão RL-1C com 4 horas de exposição da mistura à temperatura ambiente e secagem em estufa a 40° de temperatura
- Quanto ao desgaste, o ensaio de durabilidade mostrou-se apropriado tal como no caso de solo-cimento, mas sugerem os autores a utilização de maior número de traços, para diferentes tempos de exposição antes da compactação, a temperatura ambiente.

MICELI (2006)

Estudou três solos do estado de Rio de Janeiro misturados com teores de emulsões RM e RL-1C, entre 0 e 8%. A avaliação deste estudo foi sob o ponto de vista da mecânica dos pavimentos. Inclui a caracterização das emulsões utilizadas na mistura com os solos. Os ensaios realizados nos solos puros e com adição de emulsão foram:fotografias com o microscópio eletrônico de varredura, resistência à compressão simples, ensaio triaxial dinâmico, resistência à tração indireta, módulo de resiliência na tração diametral, ensaios de desgaste (LWT e WTAT).

Foram também processados no programa FEPAVE2 estruturas de pavimento hipotéticas com os resultados de módulos de resiliência obtidos com os solos estudados e para finalizar o estudo, foi feita uma experiência de campo em Minas Gerais.

A principal conclusão deste trabalho foi que sob o ponto de vista da mecânica dos pavimentos, existe uma diferença no comportamento de solos granulares e solos finos, sendo que a utilização de emulsão na estabilização de solos granulares é viável.

SANT' ANA et al (2007)

O objetivo deste trabalho foi o estudo do método de execução adotado para a conformação de uma camada de base de solo-emulsão.

Para a adoção do teor de emulsão foram realizados ensaios de resistência à compressão simples (RCS). O teor de emulsão a ser adotado não é definido como um "teor ótimo" no sentido do que confere a maior RCS mas sim o teor que confere ao solo a resistência à compressão simples e resistência ao desgaste suficiente para o baixo volume de tráfego ao qual estará submetido.

Os CPs submetidos a ensaios de RCS foram deixados em cura 7 dias ao ar e alguns deles foram imersos em água durante 1h e 24 horas. Estes últimos, após as 24 horas de imersão foram deixados ao ar novamente durante 4 horas, isto para avaliar a influência d'água nos ensaios de RCS.

O teor adotado para a realização da pista experimental foi de 4% em peso de RL-1C, e algumas das conclusões foram:

- As etapas de escarificação e gradeamento devem ser executadas com maior cuidado porque podem alterar a quantidade de solo que se tinha previsto para o recebimento da emulsão.
- A emulsão foi colocada em uma única etapa, o que dificultou a homogeneização da mistura.
- A utilização da "caneta" para espargir a emulsão não se mostrou eficaz neste caso porque a taxa de emulsão era alta e o tempo de exposição da emulsão na superfície seria longo, comprometendo a homogeneização da mistura.

2.3 Métodos de dimensionamento

Tal como para os pavimentos asfálticos tradicionais de bases e sub-bases granulares, os métodos de dimensionamento de pavimentos com bases de solo - cimento e solo – asfalto foram de natureza empírica nas suas origens. A atenção concentrava-se na qualidade da mistura e métodos de dosagem. A resistência era avaliada pelos ensaios de compressão axial e de CBR.

As vantagens de usar um procedimento mecanístico dando ao método de dimensionamento um caráter teórico-experimental, vêm ilustradas em Motta (1991). Para aplicação deste método os materiais devem ser caracterizados por ensaios diferentes dos citados e usados nos métodos empíricos, que permitam a obtenção dos módulos de resiliência, o que se faz com ensaios triaxiais de carga repetida. Portanto, uma nova geração de estudos de solo-asfalto necessitam ser realizados com objetivo de determinar a influência deste produto na modificação das características tensão-deformação do solo.

O dimensionamento dito mecanístico é sempre um método de verificação, e pode ser representado pelo fluxograma da Figura 2.5 (MOTTA, 1991):

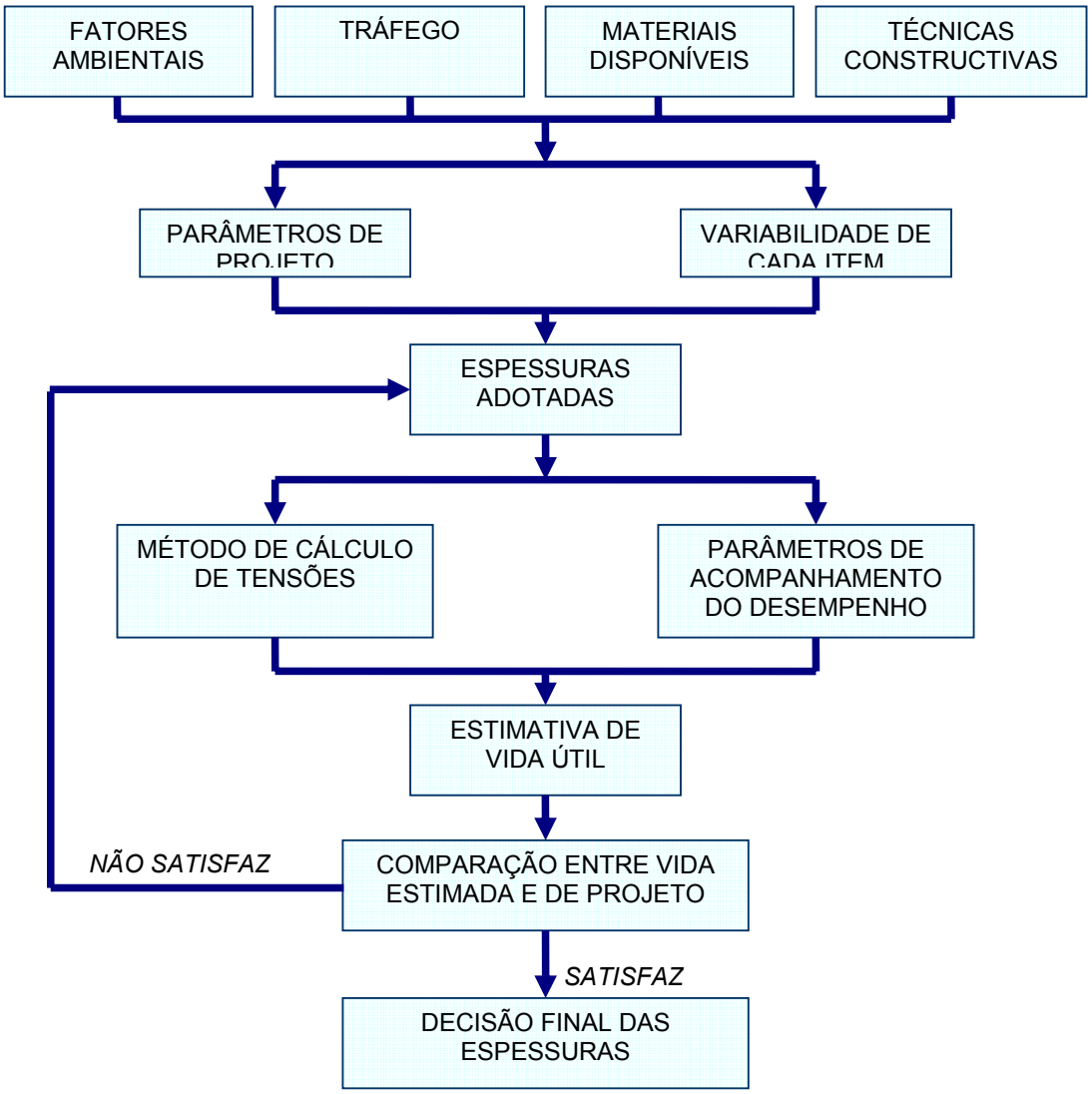


Figura 2.5 – Fluxograma de um método mecanístico de dimensionamento de pavimentos (MOTTA, 1991)

MOTTA (2003) propõe um roteiro para o dimensionamento mecanístico que consiste em:

1. "Ensaiar os materiais disponíveis na região e no subleito para se obter os módulos de resiliência e as leis de deformação permanente, considerando as variações de umidade que possam ocorrer.
2. Definir um valor de módulo de resiliência para a mistura asfáltica a ser utilizada no revestimento em função da temperatura média esperada para o local da obra ao longo do ano. Dosar a mistura para satisfazer esta condição, durante a obra vai ser essencial para que o projeto tenha sucesso.
3. Adotar uma estrutura inicial, definindo as espessuras de cada camada, com os materiais disponíveis.

4. Calcular o estado de tensões e deformações atuantes na estrutura carregada com o eixo padrão. Em geral, os parâmetros de verificação críticos são: a deflexão prevista na superfície, a deformação de tração no revestimento (ou a tensão de tração ou a diferença de tensões) e a tensão ou deformação de compressão vertical no subleito.
5. Comparar os valores calculados de deformações e tensões com os critérios de ruptura estabelecidos em função do número N de projeto (curvas de fadiga, deflexão admissível e deformação de compressão admissível no subleito)
6. Verificar o afundamento de trilha de roda previsto para o número N de projeto, considerando-se a distribuição de todas as camadas e comparar com valores admissíveis.
7. Se todos os critérios previstos em 5 e 6 forem atendidos, considera-se o pavimento dimensionado. Caso algum dos critérios seja ultrapassado, deve-se alterar as espessuras e refazer os cálculos de tensões e deformações e a comparação com os limites exigidos para o nível de tráfego de projeto".

No fluxograma da Figura 2.1 na etapa relativa ao cálculo de tensões e deformações geradas na estrutura pela carga do tráfego, as metodologias atualmente em uso para este cálculo consideram os materiais segundo dois comportamentos tensão-deformação:

- Comportamento elástico-linear: admite constante o Módulo de Resiliência de um determinado material, ao longo de toda a camada constituída pelo mesmo.
- Comportamento elástico-não linear: o valor do Módulo de Resiliência depende do estado de tensões a que o material esteja submetido, sendo então variável ao longo da camada.

A partir destes modelos de comportamento foram desenvolvidos diversos programas computacionais que permitem o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos. Estes sistemas tiveram sua formulação matemática fundamentalmente apoiada na teoria da elasticidade, que é usada na mecânica dos pavimentos.

O método da resiliência proposto por MOTTA (1991), utiliza como ferramenta de cálculo de tensões e deformações o programa de computador o FEPAVE 2 que será descrito posteriormente.

2.3.1. Módulo de Resiliência

Em 1955, Francis Hveem realizou o primeiro estudo sistemático para determinar a deformabilidade de pavimentos, estabelecendo valores máximos admissíveis de deflexões para a vida de fadiga satisfatória de diferentes tipos de pavimentos. Hveem

relacionou o trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos à deformação resiliente (elástica) das camadas subjacentes dos pavimentos (MEDINA e MOTTA, 2005).

Em fins de 1977, tendo como referência para estudos de laboratório o “Special Report 162” do TRB, de 1975, iniciou-se na COPPE/UFRJ, sob a orientação do Prof. Jacques de Medina, um amplo programa de pesquisas neste setor, cujos marcos iniciais podem ser representados pelas teses de mestrado de PREUSSLER (1978) e SVENSON (1980), que trataram das propriedades resilientes dos solos arenosos e argilosos, respectivamente (MOTTA, 2003).

O módulo de resiliência dos solos para fins de pavimentação é determinado através do ensaio triaxial de cargas repetidas, o equipamento é mostrado nas Figuras 2.2 e 2.3 e é regido pela norma DNER ME 131/94: “Solos-Determinação do módulo de resiliência”.

Figura 2.6 – Equipamento triaxial dinâmico.

Figura 2.7 – Posicionamento do CP na câmara triaxial.

Nesta determinação a deformação total do corpo de prova ensaiado tem uma componente resiliente (recuperável) e outra permanente (irrecuperável) ou plástica. É a deformabilidade elástica ou resiliente que condiciona a vida de fadiga das camadas superficiais mais rijas dos pavimentos sujeitas a flexões sucessivas (MEDINA e MOTTA, 2005).

Define-se, então, o módulo resiliente ou de resiliência (MR) do solo, a partir de um ensaio triaxial dinâmino, como a relação entre a tensão-desvio aplicada axial e ciclicamente em um corpo-de-prova e a correspondente deformação específica vertical recuperável conforme a equação (2.1):

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \qquad (2.1)$$

onde:

- $\sigma_d =$ tensão desvio aplicada repetidamente $(\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3)$;
- $\varepsilon_r =$ deformação específica axial resiliente.

A execução do ensaio triaxial dinâmico têm uma fase inicial de condicionamento do corpo-de-prova, na qual se pretende reduzir a influência de deformações plásticas grandes e da história de tensões própria do solo. As tensões de condicionamento aplicadas na prática brasileira utilizam os pares σ_3 e σ_d de (20,7; 20,7kPa); (68,9; 68,9kPa) e (103,4; 309kPa) aplicando-se 500 repetições de cada um destes pares.

Após o condicionamento é realizado o ensaio propriamente dito, no qual são aplicados pares de tensão e medidas as deformações resilientes provocadas em cada estado de tensões.

Os módulos de resiliência dos solos dependem do estado de tensões atuante – as decorrentes do peso próprio mais as tensões causadas pelas cargas dos veículos. O que se procura determinar nos ensaios triaxiais é a relação experimental:

$$M_R = f(\sigma_3, \sigma_d) \qquad (2.2)$$

para as condições de densidade, umidade e grau de saturação que o solo apresenta *in situ*.

Num solo, o módulo depende da natureza do material (constituição mineralógica, textura, plasticidade da fração fina), umidade, densidade e estado de tensões, além das características do próprio ensaio (freqüência e tempo de carregamento, forma de onda, etc.). O ensaio faz-se com solos não saturados quase sempre em condições de drenagem livre (MEDINA e MOTTA, 2005).

Mantendo-se os outros parâmetros sob especificação, para cada solo o módulo de resiliência poderá ser expresso como uma função do estado de tensões aplicado durante o ensaio por modelos matemáticos com constantes experimentais. Os primeiros modelos de módulo em função ao estado de tensões que foram observados no Brasil estão mostrados na Tabela 2.2 (MEDINA e MOTTA, 2005).

Tabela 2.2 – Modelos de comportamento tensão-deformação de solos observados no Brasil (MEDINA e MOTTA, 2005).

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

2.3.2. Programa FEPAVE2

Quando se utilizam os programas de cálculo automático de tensões, deformações e deslocamentos têm-se economia de tempo e mais versatilidade. Além do mais, pode-se considerar mais facilmente a elasticidade não linear, o que é muito importante para determinados solos e materiais granulares (MEDINA e MOTTA, 2005)

O FEPAVE2 foi desenvolvido na Universidade da Califórnia, Berkeley, EUA, cuja versão 2, doada à COPPE/UFRJ, foi inicialmente implementada para o equipamento UNISYS em 1972. A partir de 1991 foi adaptada uma versão para microcomputador (MEDINA e MOTTA, 2005). É um programa de Método dos Elementos Finitos que permite a análise de estruturas flexíveis com até doze camadas de diferentes materiais, considerando-os elásticos e isotrópicos, com comportamento linear ou não. Os dados de entrada do programa são:

- Com relação às cargas: pressão do pneu e raio da carga, considerada circular e uniformemente distribuída;

- Com relação às camadas e seus materiais constituintes: quantidade, espessuras, Coeficientes de Poisson, modelo de comportamento de cada material, valores de K_i para os modelos determinados e densidade de cada material empregado;
- Malha de elementos finitos e restrições de fronteira e carregamento.

E os dados de saída são:

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

Na Tabela 2.3, são apresentados os modelos matemáticos de expressão do módulo de resiliência de solos e materiais de pavimentação em função do estado de tensões que podem ser processados neste programa.

Tabela 2.3 – Modelos matemáticos de expressão do módulo de resiliência de solos e materiais de pavimentação em função do estado de tensões (MEDINA e MOTTA, 2005).

Classe	Modelo	Comportamento	Material
0	$M_R = f(T°C)$	Visco-elástico	Betuminoso
1	$M_R = k_1\sigma_3^{k_2}$	Granular	Arenoso
2	$M_R = k_2 + k_3(k_1 - \sigma_d), para\ \sigma_d < k_1$ $M_R = k_2 + k_4(\sigma_d - k_1), para\ \sigma_d > k_1$	Cohesivo Bi-linear	Argiloso
3	$M_R =$ Constante	Elástico Linear	Misturas asfálticas.Solo cimentado de módulo elevado e solo siltoso de módulo baixo
4	$M_R = k_2 + k_3(k_1 - \sigma_d)\sigma_3^{k_5}, para\ \sigma_d < k_1$ $M_R = k_2 + k_4(\sigma_d - k_1)\sigma_3^{k_5}, para\ \sigma_d > k_1$	Combinado	Solos lateríticos finos
5	$M_R = k_1\theta^{k_2}$	Granular $f(\theta)$	Granular (dependente da soma das tensões principais)
6	$M_R = k_1\sigma_d^{k_2}$	Coesivo $f(\sigma_d)$	Argiloso (dependente da tensão desvio)
7	$M_R = k_1\sigma_3^{k_2}\sigma_d^{k_3}$	Composto $f(\sigma_3, \sigma_d)$	Todos os solos e britas (geral)

Para a saída dos resultados pode-se optar pela impressão dos valores de interesse imediato no dimensionamento (MOTTA,1991):

- Deflexão: adota-se o deslocamento vertical na superfície, correspondente ao raio igual a 15 cm multiplicando por dois para simular a roda dupla do eixo padrão e comparação com resultados de medições de campo;
- Deformação específica de tração: é calculada para a linha inferior da camada de revestimento, considerando-se a diferença de deslocamentos radiais entre o eixo de simetria da carga e a coluna mais próxima, divida pela distância entre os nós. Admite-se que sob uma das cargas este parâmetro é maior que no ponto de simetria entre as duas cargas do eixo padrão;
- Diferença de tensões no revestimento: para simular o que ocorre no ensaio de compressão diametral, calcula-se este parâmetro como a diferença entre a tensão vertical e a tensão radial do primeiro elemento sob a carga, na linha inferior do revestimento;
- Tensão vertical no subleito: como as tensões no programa são calculados no centro de cada elemento, admite-se como parâmetro a média dos valores calculados para os elementos mais próximos do centro da carga, da linha de elementos imediatamente acima do subleito e o imediatamente abaixo da cota do subleito.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho experimental foi realizado no âmbito do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ e vai desde a coleta dos solos utilizados, até a descrição dos ensaios realizados em amostras dos solos e de corpos-de-prova das misturas de solo-emulsão.

3.1. Materiais

Os materiais empregados para a moldagem dos corpos-de-prova são as emulsões asfálticas e os diferentes tipos de solo trabalhados

3.1.1. Emulsões Asfálticas

Foram utilizadas duas emulsões catiônicas, uma de ruptura média (RM-1C) e a outra de ruptura lenta (RL-1C); ambas foram fornecidas pelo CENPES-PETROBRAS em recipientes de 18 litros e 50 litros respectivamente. Estas emulsões foram distribuídas em garrafas de 2 litros para melhor manipulação durante a mistura dos CPs, conforme mostra a Figura 3.1. As mesmas emulsões foram também utilizadas por MICELI (2006).

Figura 3.1 – Distribuição de emulsões em recipientes.

3.1.1.1. Caracterização das Emulsões

Os ensaios realizados nas emulsões asfálticas utilizadas neste trabalho foram:

- Viscosidade Saybold Furol: mede as propriedades de consistência (velocidade de escoamento) das emulsões asfálticas;
- Sedimentação: detecta a tendência de os 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: é usado para determinar as proporções relativas de cimento asfáltico e água na emulsão asfáltica. Alguns tipos de emulsão também contêm um destilado de óleo; esta quantidade também é fornecida por este ensaio.

Na Tabela 3.1 encontram-se citados estes ensaios junto a norma técnica que os regula. Os ensaios foram realizados no laboratório do IPR por MICELI (2006).

Tabela 3.1 – Ensaios realizados nas emulsões asfálticas utilizadas neste estudo.

Ensaio de Classificação	Norma técnica reguladora	Valor referência	RM	RL
Ensaio de viscosidade Saybolt-Furol	P-MB-517	20-200	33,5	32
Ensaio de sedimentação	NBR 6570	Max. 5	2,16	
Ensaio de carga da partícula	NBR 6567	Positiva	Positiva	Bi-iônica/ Não-iônica
Ensaio de destilação	NBR 6568	Min. 62	67	62

3.1.2. Solos: Definição das jazidas

Este estudo não visava especificamente estudar os solos do Estado do Rio de Janeiro, mas solos de diferentes texturas dentre os indicados como possíveis de serem estabilizados com asfalto, de preferência complementares aos tipos já analisados em MICELI (2006), que também participa do projeto CTPETRO TAPTS, aumentando o banco de dados de ensaios dinâmicos de solo-emulsão. Assim, os três solos analisados nesta dissertação foram obtidos no interior do Estado do Rio de Janeiro, devido à facilidade de coleta e proximidade do Laboratório de Geotecnia da COPPE, lugar onde se desenvolveram todos os ensaios.

3.1.2.1. Pedra de Guaratiba

O primeiro solo foi coletado com ajuda da Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro, indicado como um material bastante granular, usado como revestimento primário. Não se tem muitas informações da origem e do local de onde este material foi obtido. A intenção era obter um material que estivesse sendo usado em uma pavimentação de uma rua, para comparar com o uso corrente do mesmo. Este solo foi recolhido da pista localizada na Rua Boa Esperança N° 38 (Lado esquerdo, no sentido do canal), no bairro Pedra de Guaratiba, Sub-bairro Piraquê. Foi registrado no laboratório de Geotecnia como S = 748 e para o presente trabalho foi denominado como “Solo 1”. Na
Figura 3.2 mostram-se aspectos do local de coleta desta amostra.

Figura 3.2 – Coleta de material na Pedra de Guaratiba.

3.1.2.2. Campo Grande

Antes de coletar os dois solos restantes, foi feita uma visita à Jazida Alvorada, localizada no município do Rio de Janeiro/RJ, no Bairro de Campo Grande. Esta jazida encontra-se em exploração para uso em pavimentação pela Prefeitura.

Durante esta visita foram coletadas seis amostras de solo, as quais foram caracterizadas em laboratório. Este procedimento foi realizado com o objetivo de escolher diferentes tipos de solo para a continuação da pesquisa, nos locais indicados na Figura 3.3

Figura 3.3 – Localização das 6 amostras coletadas para caracterização.

Das seis amostras já classificadas foram escolhidas duas, correspondentes aos pontos de coleta 2 e 6 da Figura 3.3. Retornou-se à jazida e foram coletadas as outras amostras, registradas no laboratório como S = 789 e S = 821; denominadas como “Solo 2” e “Solo 3” respectivamente, neste trabalho. Na Figura 3.4 mostra-se a aparência dos dois solos coletados na jazida.

Figura 3.4 – À esquerda, coleta do Solo 2 e a direita coleta do Solo 3

3.2. Andamento da parte experimental

Numa primeira etapa, os ensaios foram desenvolvidos com um dos materiais (Solo 1-NA’), da seguinte maneira:

- Inicialmente tinha-se a disponibilidade da emulsão de ruptura média (RM-1C) fornecida pela PETROBRAS dentro do Projeto TAPTS, e com ajuda da Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro, foi obtido um material arenoso que se chamou de Solo 1. Previamente à realização da mistura solo-emulsão, procedeu-se aos ensaios de caracterização do Solo 1, e também foi realizado o ensaio de compactação Proctor Normal.
- Moldaram-se CPs para ensaios de Resistência à compressão simples (RCS) com teores de 0, 2, 4 e 6% de emulsão RM-1C com 7 dias de cura ao ar livre.
- Com os resultados obtidos, observou-se que os teores de emulsão foram muito altos para o tipo de solo disponível (as curvas não apresentavam picos), por isso partiu-se para a moldagem de CPs para ensaios de RCS com teores de 0, 1, 2 e 3% de RM-1C com cura de 7 dias.
- Desta vez, os resultados apresentaram um pico quando a emulsão asfáltica foi adicionada em 1%, então se definiu que o objetivo desta etapa seria a moldagem de CPs para ensaios de RCS e Triaxial Dinâmico com teores de 0, 1, 2 e 3% de RM-1C com cura de 7, 28 e 56 dias ao ar livre e procede-se a completar este objetivo.

Tinha-se considerado também, nesta etapa, a realização de ensaios de RCS e Triaxial dinâmico, com os mesmos teores e tempos de cura mencionados no último ponto, para a emulsão de ruptura lenta (RL-1C). Além disso, pensou-se em fazer uma comparação da cura ao ar com a cura em estufa e começou-se a realizar testes para ensaios Triaxiais Dinâmicos com CPs com teores de 0, 1, 2 e 3% de RM-1C com tempos de cura de 24, 48 e 72 horas na estufa a uma temperatura de 70°C (testes que não foram completados porque esta temperatura era excessiva para as emulsões).

Percebeu-se, que os resultados obtidos parcialmente com emulsão do tipo RM-1C para tempos de cura de 7, 28 e 56 dias, mostravam uma melhoria com a adição de emulsão e que quanto maior o tempo de cura melhor era o comportamento do solo, mas não podia-se garantir que esta melhoria fosse apenas pela adição da emulsão, mas pela perda de umidade do CP, umidade que como será explicado adiante, consiste de uma parcela contida no solo e a outra contida na emulsão.

Então, tomando em conta estes fatos, fechou-se temporariamente o trabalho do Solo 1 (NA') com a realização de ensaios de RCS e Triaxiais Dinâmicos com teores de 1, 2 e 3% também de emulsão do tipo RL-1C, só para um tempo de cura igual a 7 dias ao ar.

A partir desta etapa, foram obtidas duas novas amostras de solo, referidas como Solo 2 (NG') e Solo 3 (NS'). Para estes materiais o programa experimental foi o relatado a seguir:

- Escolheram-se os teores de 0, 2, 4, 6 e 8% de RM-1C para fazer testes com CPs para RCS ensaiados na hora e, considerando a bibliografia encontrada, também foram realizados testes de CPs para RCS deixando a mistura ao ar durante 2 e 4 horas antes da compactação, com teores de 0 e 6% de RM-1C.
- Com os resultados dos testes, definiu-se para esta que foi chamada de segunda etapa, a realização de ensaios de RCS e Triaxiais Dinâmicos em CPs moldados na hora e com 7 dias de cura ao ar. Quanto aos teores de emulsão; no caso do Solo 2 (NG') foram moldados CPs com 0, 4, 6, e 8% de RM e RL-1C e no caso do Solo 3 (NS'), que também seguiu o processo de caracterização, classificação MCT Simplificado e compactação pelo Proctor Normal seguido pelos outros solos, realizou-se a moldagem de CPs com 0, 1, 2 e 3% de RM e RL-1C.

Algumas observações importantes de esclarecer são:

- Que as amostras de solo utilizadas na primeira parte do trabalho foram todas destorroadas (D), já na segunda etapa além de trabalhar com este tipo de amostras,

utilizam-se amostras não destorroada (ND), isto com a tentativa de simular melhor as condições de trabalho em campo. O detalhe de como são preparadas as amostras de solo encontram-se na seção 3.4 deste capítulo;

- Que para cada teor de emulsão asfáltica e cada tempo de cura, foram moldados três CPs para o ensaio de RCS e um para o Triaxial Dinâmico.
- Que o ensaio Triaxial Dinâmico foi realizado duas vezes no CP, a primeira com o CP depois do tempo de cura estabelecido e a segunda, depois da determinação da absorção do CP posicionado durante 48 horas, na primeira etapa numa bandeja com pó de pedra saturado e na segunda etapa numa bandeja com pedras porosas. Estes procedimentos serão, descritos na seção 3.6.2.

Finalizada a segunda etapa, volta-se a trabalhar com o Solo 1 (NA'), moldando CPs para ensaios Triaxiais Dinâmicos realizados na hora, com teores iguais a 0, 1, 2% de RM e RL-1C.

Depois disso, fez-se uma pequena análise dos resultados dos Solos 2 (NG') e 3 (NS') e notou-se que não existe uma correlação entre as curvas de (% Emulsão x RCS) e as de (% Emulsão x Módulo de resiliência médio), então moldam-se CPs com 10% de RM e RL-1C com 7 días de cura ao ar para ensaios Triaxiais Dinâmicos com o Solo 2 (NG'), e CPs com 4% de RM e RL-1C ensaiados na hora para a obtenção do módulo de resiliência com o Solo 3 (NS').

A partir desses ensaios, faz-se uma nova análise e define-se os teores e tempos de cura a serem utilizados para a realização dos ensaios de desgaste: Loaded Wheel Test (LWT) e Wet Track Abrasion Test (WTAT). No caso do Solo 2 (NG'), moldam-se CPs com 0 e 8% de RM e RL-1C com um tempo de cura igual a 7 dias e no caso do Solo 3 (NS'), são CPs ensaiados na hora, com teores iguais a 0% em solos destorroados (D) e não destorroados (ND), 1%RM-1C para o (SD) e 3% de RM e RL-1C para os resto dos CPs. Isto será detalhado no item 3.6.2 do presente capítulo para melhor entendimento.

A seguir, descrevem-se passo a passo os materiais e os procedimentos seguidos para a realização da parte experimental desta dissertação.

3.3. Determinação das quantidades de materiais para à mistura

A determinação das quantidades de materiais a serem utilizados na mistura de solo-emulsão implica o conhecimento de certos parâmetros que influem neste tipo de mistura, sobre tudo referente aos teores de água envolvidos.

Sabe-se que além da umidade higroscópica do solo tem-se uma parcela de água contida na emulsão, determinada em ensaios de destilação ou em resíduo por aquecimento de emulsões asfálticas. Também, como foi visto na bibliografia, existem 3 teores diferentes de água contidos na mistura. O teor de água de dispersão, o teor de água de diluição e o teor de água de compactação.

O teor de água de compactação refere-se ao total de água contido na mistura, no presente trabalho, considera-se a água de compactação como a quantidade com a qual os CPs, alcançam a umidade ótima, isto tomando em conta o ensaio de compactação pelo Proctor Normal, realizado previamente no solo puro.

Também, é importante mencionar que a água de dispersão, não foi propriamente calculada, simplesmente, antes de adicionar a emulsão, colocou-se uma parcela da água calculada com base no solo puro. E no que se refere à água de diluição da emulsão, considerou-se a relação 1:1, ou seja, uma parte de emulsão para uma parte de água.

Com estas considerações, determinam-se, então, as quantidades para a mistura com ajuda de uma planilha de EXCEL, mostrada na Tabela 3.2 . Os dados de entrada são os seguintes:

- Solo, refere-se ao tipo de solo utilizado;
- Tipo de emulsão;
- % Emulsão;
- U. ot.: indica a umidade ótima do solo, que foi conseguida mediante o ensaio de compactação PROCTOR Normal com o solo puro;
- U. hg.: é a umidade higroscópica do solo preparado para a mistura;
- Quantidade de solo, que depende do tipo de CP a ser moldado;
- Água existente na emulsão, que equivale a 33% da quantidade de emulsão calculada para emulsões do tipo RM-1C e 38% para as do tipo RL-1C.

Obtêm-se, como dados de saída: a quantidade de emulsão; a quantidade de água de diluição; a quantidade de água a ser adicionada no solo.

Exemplo de cálculo

Como exemplo das expressões utilizadas no cálculo da citada planilha considere-se o Solo 2, com um teor de emulsão igual a 8% de emulsão RM-1C (segundo cálculo mostrado na Tabela 3.2). Sabe-se que a quantidade de solo para a moldagem de 3 CPs

de RCS é de 6Kg (6000g), que o solo preparado têm uma umidade higroscópica de 2% e que a umidade ótima deste solo é de 19,5%. Para facilitar os cálculos, calcula-se primeiro o peso do solo seco P_S:

$$P_S = \frac{Q.\ Solo}{1+\left(\frac{U.hg}{100}\right)} \tag{3.1}$$

No exemplo:

$$P_S = \frac{6000}{1+\left(\frac{2}{100}\right)} = 5882{,}35g$$

A seguir, determina-se a quantidade de emulsão a ser colocada em função da percentagem escolhida

$$Q.\ Emulsão = \frac{\%Emulsão}{100} * P_S \tag{3.2}$$

$$Q.\ Emulsão = \frac{8}{100} * 5882{,}35 = 470{,}58 \cong 471\ g$$

Foi definido que para o cálculo da água de diluição seria considerada relação de 1:1, então, tem-se:

$$Água\ diluição = 471\ g$$

A seguir, como se utiliza para o exemplo a emulsão tipo RM-1C, faz-se o cálculo da água existente na emulsão, sabendo que contêm 33% da quantidade da emulsão calculada:

$$Água\ na\ emulsão = \frac{33}{100} * Q.\ Emulsão \tag{3.3}$$

$$Água\ na\ emulsão = \frac{33}{100} * 471 = 155{,}43 \cong 155\ g$$

O cálculo da água de compactação equivalente ao total de água a ser adicionada na mistura para conseguir que o CP atinja a umidade ótima leva em conta que o solo têm 2% de umidade higroscópica, portanto seriam acrescentados só 17,5%, isto se faz seguindo a seguinte fórmula :

$$Água\ de\ compactação = P_S * \left(\frac{U.\ ótima}{100} - \frac{U.hg}{100}\right) \tag{3.4}$$

Sendo igual, no exemplo:

$$Água\ de\ compactação = 5882{,}35 * \left(\frac{19{,}5}{100} - \frac{2}{100}\right) = 1029{,}4 \cong 1029\ g$$

Com isto, tem-se que a água a ser adicionada no solo será:

$$Água\ no\ solo = Água\ de\ compac. - (Água\ diluição + Água\ na\ emulsão) \quad (3.5)$$

$$Água\ no\ solo = 1029 - (471 + 155) = 403\ ml$$

Tabela 3.2 – Exemplo de resultados da planilha de EXCEL utilizada no cálculo para preparação dos corpos-de-prova

Solo	T. Emul.	% Em.	%U. ot.	%U. hg	Q. solo	Q. Emul.	H2O Diluição	H2O na Emul.	H2O compac.	H2O Solo
S- 1	-	0	9,5	0	4000	0	0	0	380	380
S- 2	RM	8	19,5	2	6000	471	471	155	1029	403
S- 3	RL	2	14,2	3	6000	117	117	44	652	492

3.4. Preparação das amostras de solo

Quando se fala em preparação dos solos, faz-se referência ao processo ao qual o solo é submetido antes de ser misturado com a emulsão asfáltica, no mínimo 24 horas antes. Foram seguidos dois procedimentos de preparação de solos, o do Solo Destorroado (D) e a do Solo Não Destorroado (ND) como mostrado a seguir.

A preparação do Solo destorroado, segue os seguintes passos:

1. Secagem em estufa a 70°C no mínimo durante 18 horas;
2. Destorroamento com ajuda do almofariz;
3. Peneiramento:
   - Solo 1: utilizou-se o solo passante na peneira 25,4mm (1") para CPs de (RCS) e Triaxial Dinâmico
   - Solos 2 e 3: utilizou-se o solo passante na peneira 19mm (3/4") para CPs de RCS e passante na peneira 25,4mm (1") para Triaxial Dinâmico
4. Quarteamento;
5. Separação em sacos plásticos cujo pesso foi: RCS: 6 Kg; Triaxial Dinâmico: 4Kg; LWT: 1,7 Kg e WTAT: 5,7 Kg.

A preparação dos solos 2 e 3 Não Destorroados, ou melhor dito, Destorroados na mão (grosseiramente), foi realizado com o objetivo de simular melhor as condições do solo no campo e é descrito a seguir:

1. Secagem ao ar, mínimo 24 horas, dependendo da umidade natural;
2. Destorroamento na mão;
3. Peneiramento:
   - Solos 2 e 3: utilizou-se o solo passante na peneira 25,4mm (1") para CPs de RCS e Triaxial Dinâmico

4. Quarteamento;
5. Separação em sacos plásticos cujos pesos foram os mesmos já citados

È importante ressaltar que tanto para a preparação de solo destorroado quanto para a de não destorroado, foram tiradas no mínimo duas cápsulas para a determinação da umidade higroscópica do solo. Esta umidade foi mantida até a hora da mistura, já que as porções individuais de solos para cada ensaio como foi dito no passo 5, foram separados em sacos plásticos vedados.

Na Figura 3.5, mostram-se os procedimentos seguidos na preparação dos solos.

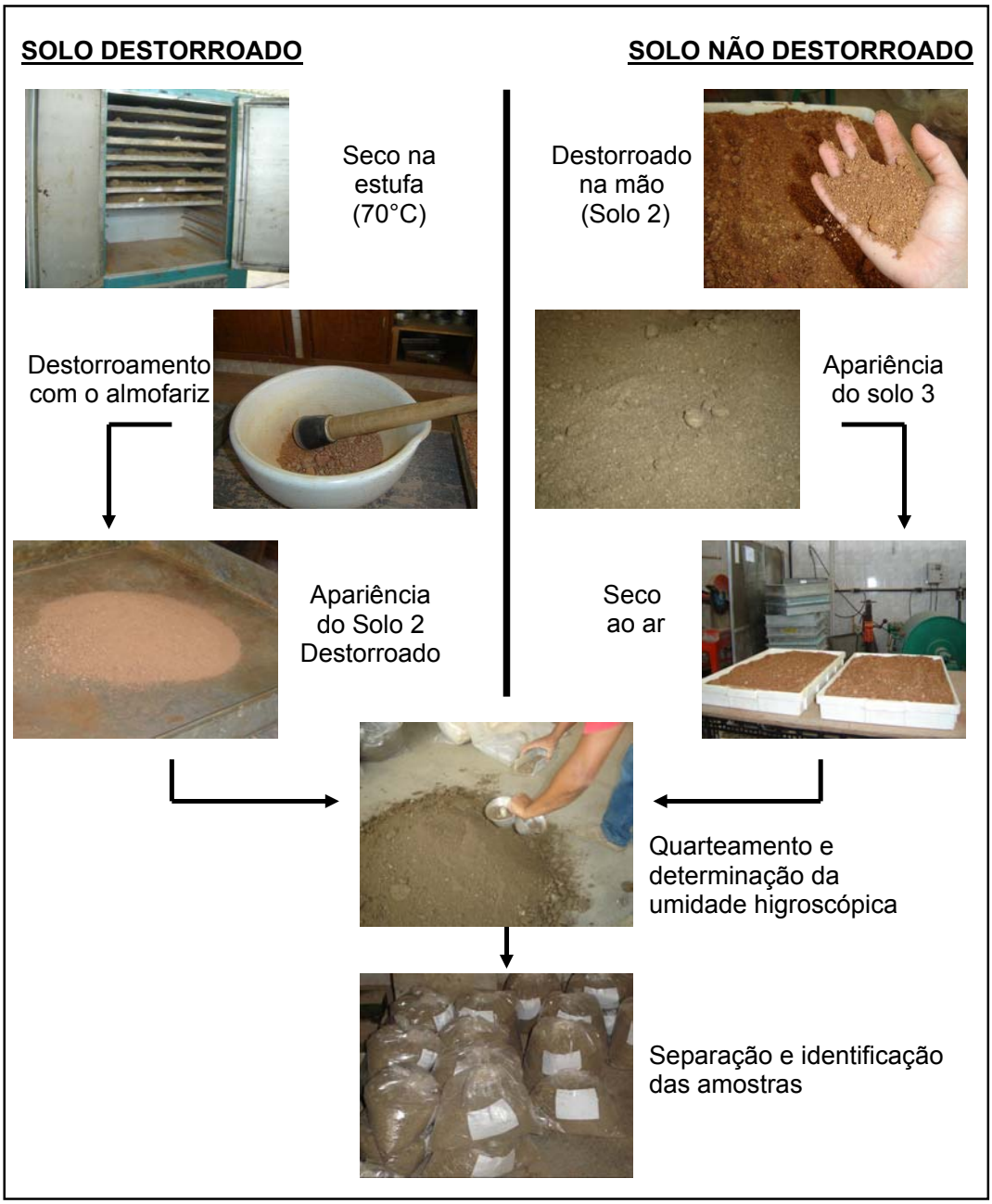


Figura 3.5 – Passos do procedimento de preparação de amostras de solo para os ensaios desta dissertação.

3.5. Procedimento de mistura solo-emulsão

O processo de mistura terá grande influência no resultado da estabilização solo-emulsão, vindo a se refletir no melhor ou pior envolvimento das partículas com o material betuminoso e na maior ou menor aderência entre partícula de ligante e grãos de solo (JACINTHO, 2005).

No presente trabalho, os passos seguidos para garantir uma boa homogeneização da mistura solo-emulsão foram feitos da maneira ilustrada pelas fotos da Figura 3.6, que são os seguintes:

1. Coloca-se o solo sobre uma bandeja limpa;
2. Adiciona-se ao solo uma parte da água de compactação calculada;
3. Mistura-se e deixa-se o solo pronto para receber a emulsão ;
4. A seguir é pesada a quantidade de emulsão calculada segundo o teor desejado;
5. Se houver, tira-se o excesso de emulsão;
6. Verte-se no Bequer a quantidade de água de diluição determinada e mexe-se o conteúdo para homogeneizá-la;
7. Em continuação, espalha-se a emulsão no solo;
8. A água reservada, é colocada no Bequer, isto com a finalidade de enxaguar o Bequer para não deixar restos de emulsão nele;
9. Uma vez adicionada a água restante, procede-se à mistura do solo emulsão;
10. Os passos 10, 11, 12 e 13 ilustrados na Figura 3.7 é o procedimento seguido com o objetivo de conseguir uma massa o mais homogênea possível;
14. No caso de se moldar 3 CPs, com a mesma mistura (para RCS), separam-se 3 porções e coloca-se o solo-emulsão em sacos plásticos para que não exista perda de umidade de compactação;
15. Verificação da umidade de moldagemusando pelo menos duas cápsulas.

Estes passos, foram realizados para todas as misturas realizadas com solo-emulsão. No caso do solo puro, simplesmente foram homogeneizados os solos com a quantidade de água de compactação necessária para que atinja-se a umidade ótima de cada amostra.

Figura 3.6 – Passos do procedimento seguido na mistura de solo-emulsão usado neste estudo.

3.6. Ensaios realizados

Os ensaios realizados nesta dissertação são separados em ensaios realizados somente com solos puros, e ensaios realizados com solos puros e com solo-emulsão.

3.6.1. Ensaios realizados com solos puros

Estes ensaios correspondem a parte de caracterização, classificação pelo MCT e compactação. Na caracterização, os ensaios realizados foram o de sedimentação, granulometría e os limites de Aterberg, seguindo as normas descritas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Ensaios de caracterização realizados nas amostras deste estudo.

Ensaio	Norma técnica reguladora
Sedimentação	DNER – 051/94
Granulometría	DNER – 080/94
LL	DNER – ME 122/94
LP	DNER – ME 082/94

Com referência à classificação MCT, regulada pela Norma DNER – CLA 259/96, temos de diferenciar que, para o Solo 2 (NG') foi realizado o procedimento tradicional e no caso dos Solos 1 (NA') e 3 (NS'), foi aplicado o método simplificado (MARANGON, 2004), por se tratar de um solo arenoso (1) e outro siltoso (3). Ressalte-se ainda que o solo 1 não atende às características granulométricas para aplicação da MCT, porém esta classificação foi realizada visando caracterizar a fração passante na peneira N°10.

O ensaio de compactação para a determinação da umidade ótima se fez pelo procedimento Proctor Normal. Este procedimento também corresponde ao realizado para a compactação de CPs para ensaios triaxiais dinâmicos e será descrito na próxima seção deste capítulo.

3.6.2. Ensaios realizados com solos puros e com solo-emulsão

A realização destes ensaios com solos puros, é sempre para obter o parâmetro inicial, a partir do qual o solo mostraria ou não uma melhoria. Estes ensaios são:

Resistência à compressão simples

A realização deste ensaio foi feita seguindo a norma DNER – ME 202/94 com adaptações pertinentes à mistura solo –emulsão. Sabe-se que idealmente os corpos-de-prova para ensaio de RCS devem apresentar relação altura –diâmetro de 2:1. No entanto, como a norma de solo –cimento citada para facilitar a operacionalização das

preparações dos CPs estabeleceu o uso do molde do Proctor, resolveu-se utilizar o mesmo procedimento, tal como foi realizado por MICELI (2006). Esta decisão também ajuda a diminuir o volume de amostra necessário para os ensaios feitos em triplicata e permite uma comparação relativa com a ordem de grandeza do valor de RCS admitido para solo- cimento. O procedimento de compactação dos CPs e o ensaio propriamente dito, seguiram os seguintes passos, mostrados na Figura 3.7:

1. A mistura era colocada em sacos para evitar a perda de umidade de compactação;
2. O equipamento utilizado consiste de um molde tripartido de 10x15 (cm), com um colarinho na parte superior e um soquete metálico cujo peso é de 3,642Kg.;
3. A altura do molde é dividida em 3 camadas de solo que serão compactadas individualmente;
4. Esta compactação é feita dando 26 golpes com o soquete metálico em queda livre, a cada camada de solo;
5. Uma vez terminada a compactação, o CP é rasado, retirado do molde e pesado na balança;
6. Se for o caso os CPs moldados são deixados em cura ao ar livre. Se não, os CPs são colocados em sacos até a hora do ensaio (que não passa de 1 hora), para evitar perda de umidade enquanto terminava-se de compactar o resto dos CPs;
7. O sétimo passo corresponde ao ensaio propriamente dito, o CP é colocado numa prensa e ensaiado a uma velocidade de 0,65mm/min. Deixa-se o CP atingir a maior resistência à compressão e logo é retirado da prensa;
8. Mostra-se no passo 8 um CP de solo 1, ensaiado após 7 dias de cura;
9. Mostra-se no passo 9 um CP de solo 2 ensaiado recém compactado.

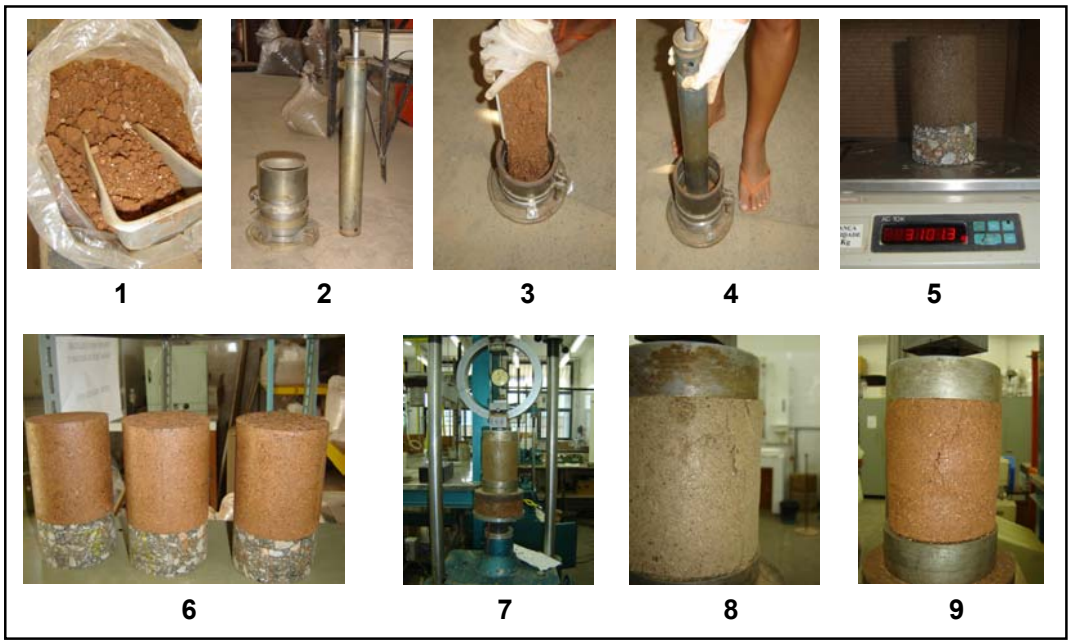


Figura 3.7 – Passos do procedimento seguido para a compactação CPs para ensaios de resistência à compressão simples.

Triaxial Dinâmico

Utilizou-se um compactador mecânico cujo martelo tem uma altura de queda de 30,5cm e seu peso de 2,5kgf.

Os passos seguidos, para a realização dos ensaios triaxiais para a determinação do módulo de resiliência, tanto de solos puros quanto de solos misturados com emulsão asfáltica são ilustrados na Figura 3.8. Estes passos são:

1. Com a mistura pronta, procede-se à moldagem dos CPs. Para isto o CP é moldado em 10 camadas de material que serão compactadas individualmente;
2. Aplicam-se 12 golpes nas primeiras seis camadas e 13 nas quatro restantes;
3. Com uma régua de madeira que indica a altura das 10 camadas nas quais é dividida a altura do molde, é possível ir verificando as alturas e controlando a quantidade de material colocado para garantir que toda a energia será aplicada na porção de amostra que permanece dentro do molde após o arrasamento na altura final do CP;
4. Para a compactação das últimas 2 ou 3 camadas é colocado o colarinho;
5. Uma vez concluída a compactação, o CP é rasado e pesado;
6. Se for o caso os CPs são deixados em cura ao ar livre;
7. Antes da realização do ensaio, o CP é pesado (se esteve em cura) e levado ao laboratório de ensaios dinâmicos. O sétimo passo mostra o ensaio triaxial sendo realizado;

Certos procedimentos precedem a realização do ensaio triaxial na prensa específica deste ensaio do laboratório de Geotecnia da COPPE:

- Primeiramente liga-se o sistema de aquisição e reprodução de dados.
- Coloca-se o CP sobre uma pedra porosa e envolve-se o CP com uma membrana de borracha, com ajuda do encamisador;
- O CP vai para a célula triaxial, recebe o cabeçõte e colocam-se elásticos envolvendo a membrana de borracha nos extremos do CP;
- Fixam-se os LVDTs ("Linear Variable Differential Transformer") ao cabeçote;
- Ajustam-se os LVDT na faixa exigida pelo programa automático do ensaio;
- Coloca-se o cilindro da célula triaxial e logo após as hastes de fixação da tampa da célula;
- Assenta-se a tampa, prendendo-se as respectivas hastes. Coloca-se a conexão da haste ao pistão de carga;
- Libera-se o ar comprimido, e ajustam-se de novo os LVDTs;
- Inicia-se a fase de condicionamento, para eliminar ou minimizar os efeitos de deformação plástica e da história de tensões. Isto se consegue aplicando 500 pulsos de carga em três estágios de aplicação de tensão desvio e confinante;
- Após o condicionamento, ajustam-se novamente os LVDTs e o começa-se a parte do ensaio para medição do MR propriamente dito;
- Finalizado o ensaio, o CP é pesado e submetido ao ensaio de absorção, que será explicado a seguir.

Ressalta-se que as condições de ensaio tanto para condicionamento quanto para o triaxial já estão programadas no equipamento da COPPE que é automatizado e foi desenvolvido na própria instituição (VIANNA, 2002)

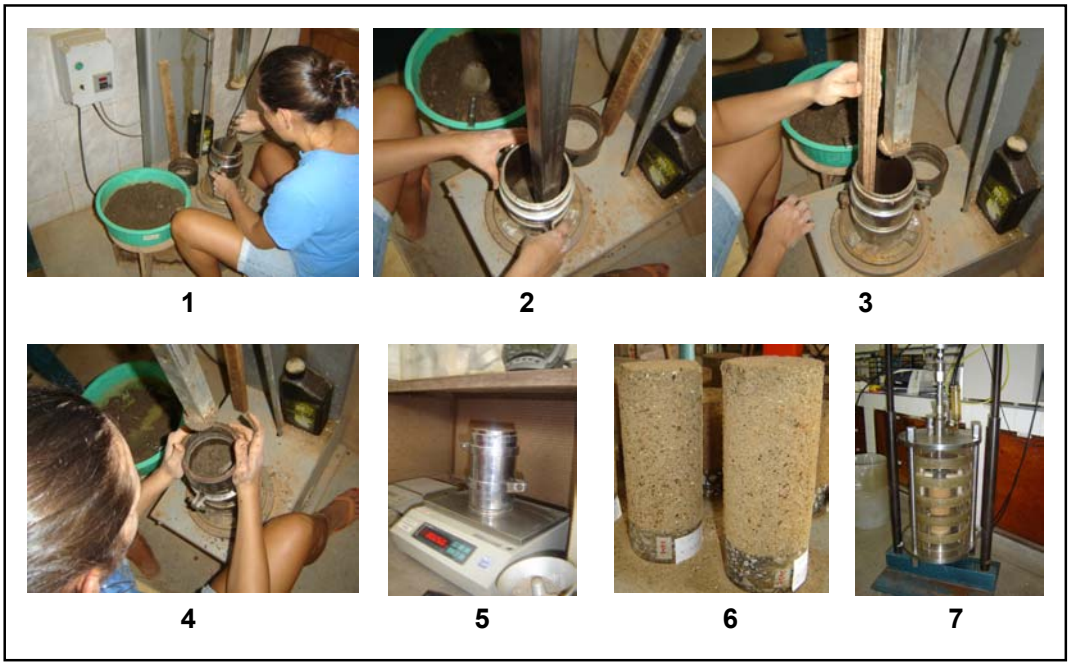


Figura 3.8 – Passos do procedimento seguido para a compactação de CPs para ensaios Triaxiais.

Absorção

Como relatado na revisão bibliográfica, a adição de emulsão aos solos pode afetar em dois sentidos: aumentando a força de coesão do solo e impermeabilizando-o.

A partir destas afirmações considerou-se importante a avaliação da absorção de água de solos estabilizados com emulsão e com este objetivo foi criado neste trabalho, um procedimento chamado de "Determinação da Absorção" que sofreu diversas modificações que foram se ajustando ao decorrer dos ensaios visando chegar a uma forma mais adequada de expor o CP ao contato com a água para testar se a emulsão tem realmente o efeito impermeabilizante.

Este procedimento realizou-se após a realização do ensaio triaxial dinâmico e é detalhado a seguir.

Na primeira etapa do trabalho, o CP era colocado sobre uma bandeja com pó de pedra saturado, sobre a qual se deixava pingando uma mangueira, isto com a finalidade de manter o pó de pedra saturado (Ver Figura 3.9). Pesava-se o CP antes de colocá-lo na bandeja e 48 horas depois de absorver água, era levado para realizar o ensaio triaxial

dinâmico de novo e depois do ensaio o CP era cortado pesado e colocado na estufa para determinar a umidade.

A primeira modificação foi quando observou-se que a absorção de água não era a mesma em todo o CP, logicamente absorvia mas na base e no topo perdia umidade, por isto diferenciaram-se 3 zonas (topo, meio e base) e então depois de pesar o CP ele era cortado em 3 partes para a determinação da umidade.

Figura 3.9 – Procedimento inicial de absorção de água pelos corpos-de-prova.

A seguinte modificação foi devido às dificuldades com este procedimento, porque o fluxo de água não era constante, então, na segunda etapa, utilizou-se uma bandeja funda na qual foram colocadas água e pedras porosas pedras porosas de igual permeabilidade e sobre elas os CPs para absorção de água.

A Figura 3.10 mostra o procedimento com todas as modificações realizadas que a seguir são descritas:

1. Concluído o ensaio triaxial, o CP é pesado e colocado sobre uma pedra porosa submersa numa bandeja funda. O CP estava separado da pedra porosa por um papel filtro para evitar a aderência do solo com a pedra.
2. Após 24 horas, o CP é pesado e colocado de novo na bandeja para completar as 48 horas de absorção;
3. Na Figura 3.10, os passos 3 e 4 mostram alguns dos defeitos apresentados por CP após 24 ou 48 horas de absorção;
4. Inicialmente estes CP foram só pesados e jogados fora, depois passou-se a cortar estes CPs em 3 partes para a determinação da sua umidade;
5. Este passo mostra um CP na bandeja que completou as 48 horas de absorção. Depois o CP é retirado e pesado;
6. Coloca-se sobre a mesa papel filme e envolve-se o CP;
7. Identifica-se o CP, colocando um sinal na direção da base do CP que ficou em contato com a pedra porosa;

8. O CP é virado ao contrário e introduzido em sacolas duplas para impedir a perda de umidade;
9. Deixa-se durante 24 horas na câmara úmida, numa tentativa de homogeneizar a umidade do CP;
10. O CP é tirado da câmara úmida e levado novamente para ser ensaiado;
11. Após o ensaio, trata-se de cortar o CP em três partes iguais;
12. Colocam-se estas partes em cápsulas diferentes para a determinação da umidade.

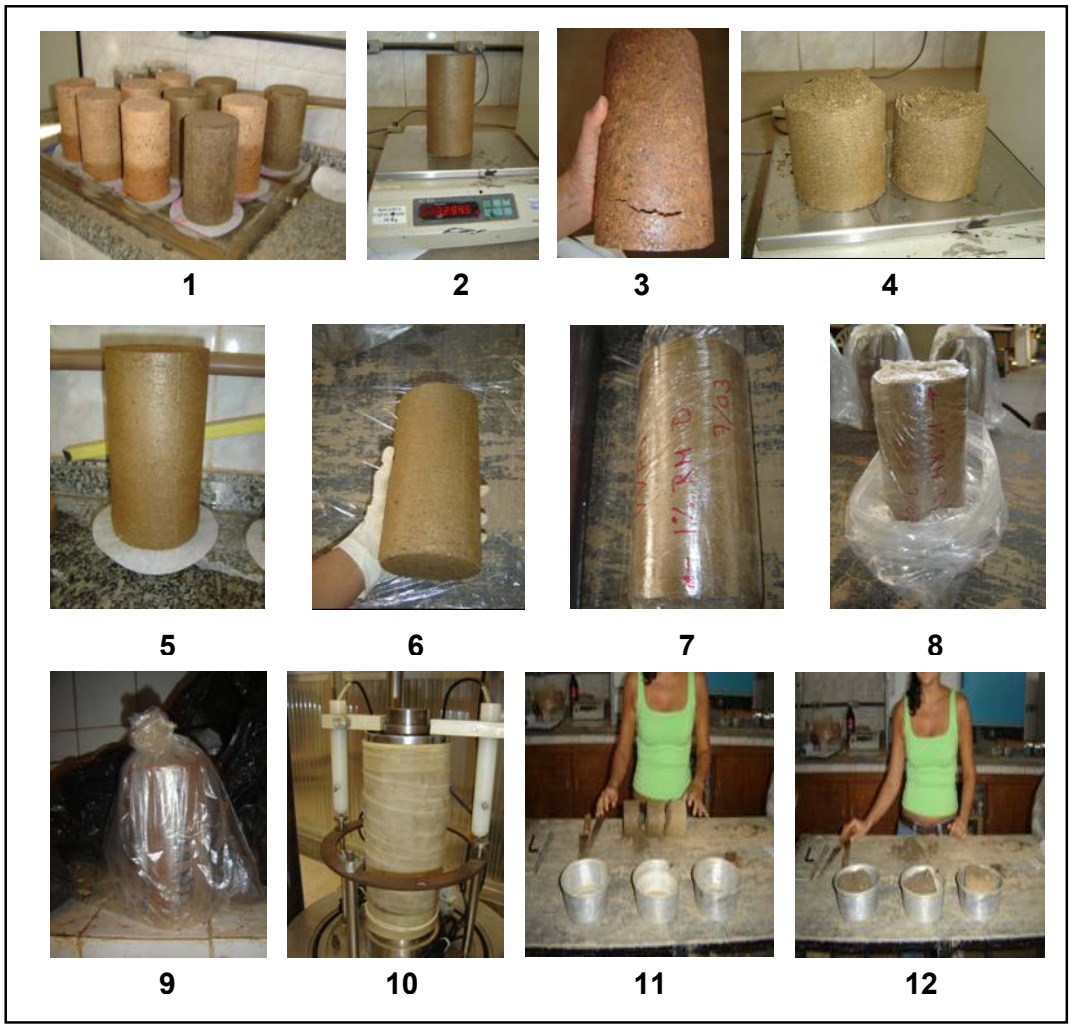


Figura 3.10 – Passos do procedimento seguido nesta pesquisa para promover a absorção de água pelos CPs submetidos a ensaios de MR.

Ensaios de desgaste

É de fundamental importância a análise não apenas à resistência mecânica da mistura mas também o seu comportamento sob à ação de um esforço abrasivo, tomando em conta que uma camada de base estabilizada com emulsão, exercendo simultaneamente

as funções de base e de revestimento, estará sujeita a esforços mecânicos e de desgaste, impostos pela solicitação do tráfego. Para simular estes esforços foram usados os ensaios de LWT e WTAT modificados por DUQUE NETO (2004).

Estes ensaios foram realizados com os Solos 2 (NG') e 3 (NS'), devido à disponibilidade deles no laboratório. Decidiu-se analisar o comportamento destes solos sob as condições que tiveram melhores resultados nos ensaios triaxiais dinâmicos.

Para o Solo 2 (NG') foram moldados CPs com solo destorroado e não destorroado, com um teor de emulsão igual a 8% de RM e RL-1C deixados 7 dias em cura ao ar livre.

No caso do Solo 3 (NS'), foram realizados ensaios na hora. Para o solo destorroado, utilizaram-se teores de 1% de RM-1C e 3% de RL-1C e para o solo não destorroado, para ambas as emulsões utilizou-se 3%.

- **Loaded Wheel Test (LWT) modificado**

O ensaio realizado nesta pesquisa - LWT modificado - é uma modificação da norma NBR 14841/2002, denominada "determinação de excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina LWT". Visa analisar as características de deformação permanente do solo quando submetido a ação do tráfego de uma roda carregada.

A modificação foi feita por DUQUE NETO (2004) para estudar a técnica do tratamento antipó. Pretendeu-se nesta dissertação estender este estudo para o solo-emulsão visto que MICELI (2006) mostrou boas perspectivas desta técnica em suas amostras.

Para a realização deste ensaio utilizaram-se moldes de 12,7mm de espessura compondo uma caixa fechada na base de dimensões internas de 50,0mm de altura, 50,8mm de largura e 381,0mm de comprimento e o êmbolo de compactação utilizado tem dimensões de 40,0mm de altura, 48,0mm de largura e 379,0mm de comprimento.

O ensaio consiste basicamente em submeter-se uma amostra, seja de solo puro ou de solo-emulsão à ação do movimento de uma roda de borracha sob condições de carga e de número de ciclos fixados. Antes do ensaio são escolhidos diferentes pontos de referência nos quais são medidas as leituras zero dos CPs. Nestes pontos de referência são realizadas as leituras das deformações correspondentes a cada número de ciclo de passagem da roda.

Os detalhes do procedimento seguido são (Figura 3.11):

1. Inicialmente o solo ou mistura solo-emulsão é homogeneizado e colocado em partes iguais em sacos plásticos. A primeira metade é espalhada sobre o molde e tampada com o êmbolo e depois coloca-se o molde sobre a prensa hidráulica;
2. Centrado o molde, aplica-se uma carga equivalente a 4 toneladas para a compactação. O molde é retirado da prensa para colocar a segunda parte de solo e procede-se à compactação da mesma forma descrita anteriormente.
3. Depois de rasar o CP, este é pesado e deixado em cura, quando for o caso. Neste trabalho foram considerados 3 pontos em cada CP nos quais foram realizadas as leituras zero com ajuda do paquímetro. Os pontos considerados encontravam-se nos extremos e no meio do CP, sendo que num dos extremos a leitura da deformação somente foi realizada ao início e fim do ensaio, devido à dificuldade que se tinha de fazer esta leitura em cada estágio;
4. No caso do Solo 2 (NG'), verificou-se que depois do tempo de cura existiam trincas e também uma pequena contração em todos os CPs e notou-se que depois de realizado o ensaio estas trincas desapareceram.
5. O CP é centrado e fixado no aparelho, tomando o cuidado de que esteja zerado o contador de ciclos. Logo a roda é abaixada e coloca-se sobre o aparelho o peso padrão de 56kgr.
6. Liga-se o aparelho e fazem-se as leituras das deformações quando são completados os estágios de 20, 50, 100, 200, 300, 500 e 1000 ciclos, verificam-se também os defeitos visuais que aparecem durante a realização do ensaio. Uma vez completados os ciclos, o CP é retirado, limpado e pesado.

Figura 3.11 – Passos do procedimento seguido para a realização do ensaio LWT modificado utilizado neste estudo.

- **Wet Track Abrasion Test (WTAT) modificado**

O procedimento usado nesta pesquisa denominado WTAT modificado é também uma modificação da norma NBR 14746/2002, originalmente denominada "determinação de perda por abrasão úmida" para microrrevestimento asfáltico a frio, que DUQUE NETO (2004) usou para estudo de desgaste de tratamento antipó.

Este ensaio avalia o desgaste do material asfáltico quando simulada a ação do tráfego. Quando aplicado ao tratamento antipó, o ensaio permite ainda uma avaliação da durabilidade da técnica, da taxa e da emulsão empregada (DUQUE NETO, 2004). Visou-se confirmar a propriedade desta técnica para dosagem de solo-emulsão conforme testado por MICELI (2006).

O molde utilizado na moldagem de CPs para este tipo de ensaios tem 6,3mm de espessura compondo um cilindro fechado na base de 50,0mm de altura e 300,0mm de diâmetro interno.

A seguir, os procedimentos de compactação e ensaio ilustrados na Figura 3.12 usados nesta pesquisa são comentados:

1. Separam-se a metade do total do solo homogeneizado e coloca-se no molde (o molde é previamente pesado vazio). Com ajuda do soquete Marshall, compacta-se o

solo dando 88 golpes distribuídos em toda a área de solo. O passo seguinte é colocar a segunda metade da amostra de solo e proceder à compactação;

2. Quando o CP estiver pronto, este é rasado e pesado na balança; se for o caso do solo 2, o CP é deixado em cura durante 7 dias;
3. Antes da execução do ensaio, o CP é novamente pesado, e com ajuda da régua mostrada no passo 4 da Figura 3.12, são determinadas as leituras zero, que no presente trabalho foram uma no meio e as outras duas nos extremos. Verificam-se também as condições visuais iniciais do CP;
4. Coloca-se o CP centrado no equipamento e trava-se o cabeçote de abrasão da mangueira de borracha no eixo da máquina. Eleva-se a plataforma da máquina até que a mangueira se apóie livremente sobre a superfície da amostra;
5. Regula-se a máquina para 110 rpm e tempo de operação igual a 5 minutos. Liga-se a máquina e espera-se o fim da aplicação do ensaio;
6. Retira-se o CP da máquina, limpa-se a superfície e a seguir pesa-se o CP;
7. Para finalizar, são feitas as leituras das deformações nos pontos que se tinha realizado as leituras zero e verificam-se as condições finais dos CPs.

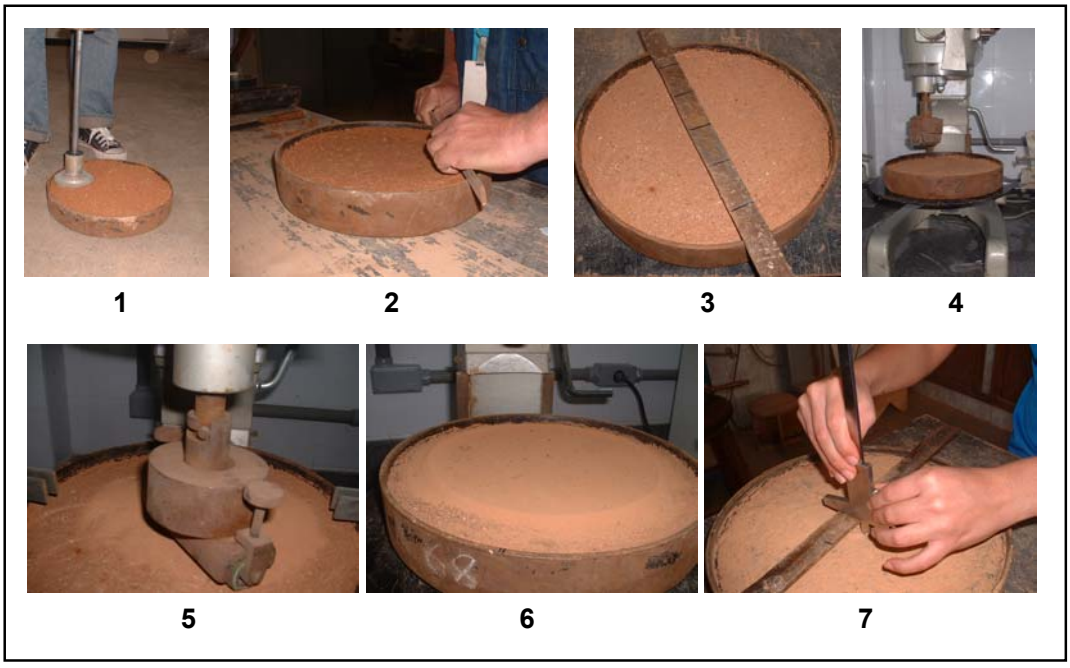


Figura 3.12 - Passos do procedimento seguido para a realização do ensaio em de CPs e ensaio WTAT.

3.7. Quantidade CPs moldados para os ensaios

Na Tabela 3.4 mostra-se um resumo do número de corpos-de-prova moldados e ensaiados neste trabalho, com as respectivas quantidades de solo utilizadas para cada tipo de ensaio.

Tabela 3.4 – Número de CPs moldados e ensaiados neste trabalho.

	Ensaio	Num. de CPs	Solo (Kg/CP)	Solo Kg.
SOLO 1	RCS	40	2	80
	Triaxial Dinâmico	22	4	88
SOLO 2	RCS	84	2	168
	Triaxial Dinâmico	28	4	112
	LWT	12	1,7	20
	WTAT	12	5,7	68
SOLO 3	RCS	84	2	168
	Triaxial Dinâmico	28	4	112
	LWT	12	1,7	20
	WTAT	12	5,7	68
	Total CPs moldados:	**334**	**Total solo:**	**906**

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Neste Capítulo são mostrados os resultados dos ensaios realizados tanto com solos puros assim como com solo-emulsão. Também são apresentadas as análises destes resultados que foram realizadas separadamente para cada tipo de solo.

4.1. Classificação dos solos estudados

A classificação dos solos, importante para poder estimar o provável comportamento dos solos foi realizada pelo Sistema de classificação TBR e a classificação MCT.

4.1.1. Caracterização física

Como foi dito no Capítulo anterior assim que as amostras de solo chegavam no laboratório, elas passavam pelo procedimento de caracterização física. As curvas granulométricas são mostradas na Figura 4.1 e a classificação de cada um deles pelo Sistema TBR, mostra-se na Tabela 4.1

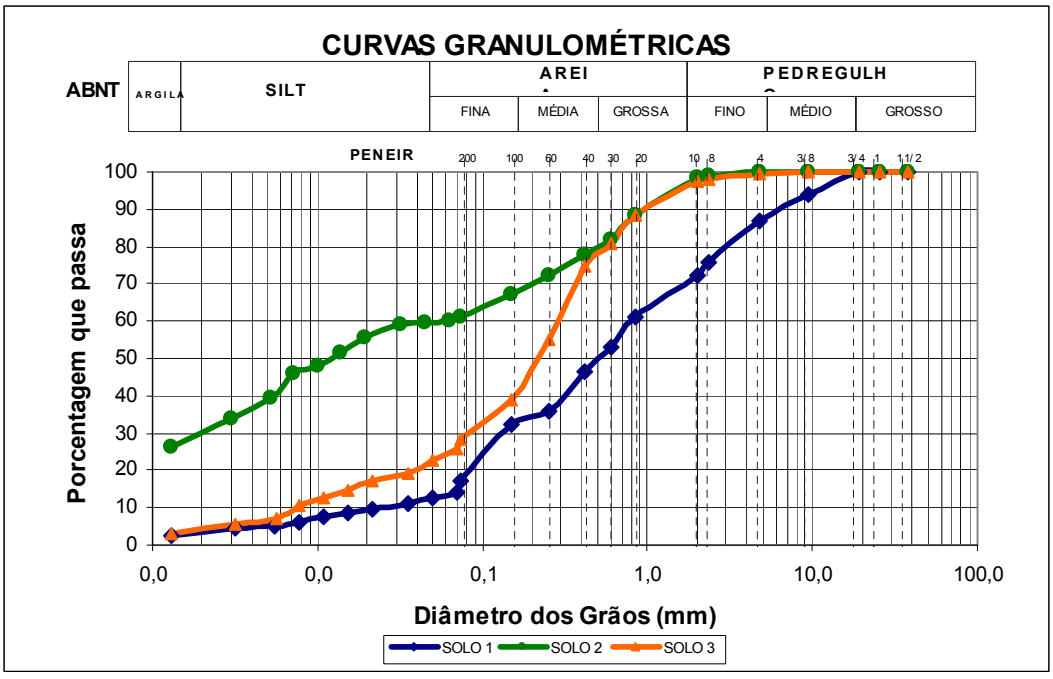


Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos 3 solos utilizados nesta pesquisa.

Tabela 4.1 - Resultados da caracterização dos solos utilizados nesta pesquisa.

Composição Granulométrica (%)					LL	IP	CLASSIFICAÇÃO TBR
	Percentagem que pasa (%)						
	#4	#10	#40	#200			
Solo 1	87	72	47	17	-	-	A-1-b
Solo 2	100	98	73	61	46	29	A-7-5
Solo 3	99	97	75	28	-	-	A-2-4

4.1.2. Classificação MCT

A classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) foi desenvolvida para solos tropicais integralmente passantes na peneira de 2mm (n° 10) com objetivo de distinguir os de comportamento laterítico e não lateríticos, especialmente para aplicação para pavimentação por Nogami de Villibor em 1981 (1995).

No caso do solo 1, como visto na Tabela 4.1, fica retido 28% na peneira de 2mm o que não permite o uso da mesma, mas decidiu-se fazer a classificação da parte passante na peneira Nº10.

Para a classificação pela MCT, foram realizados os ensaios de compactação – método Mini-MCV e o ensaio de perda de massa por imersão em água seguindo as normas mencionadas no capítulo anterior. Os dados obtidos foram processados, resultando nos pontos mostrados na Figura 4.2

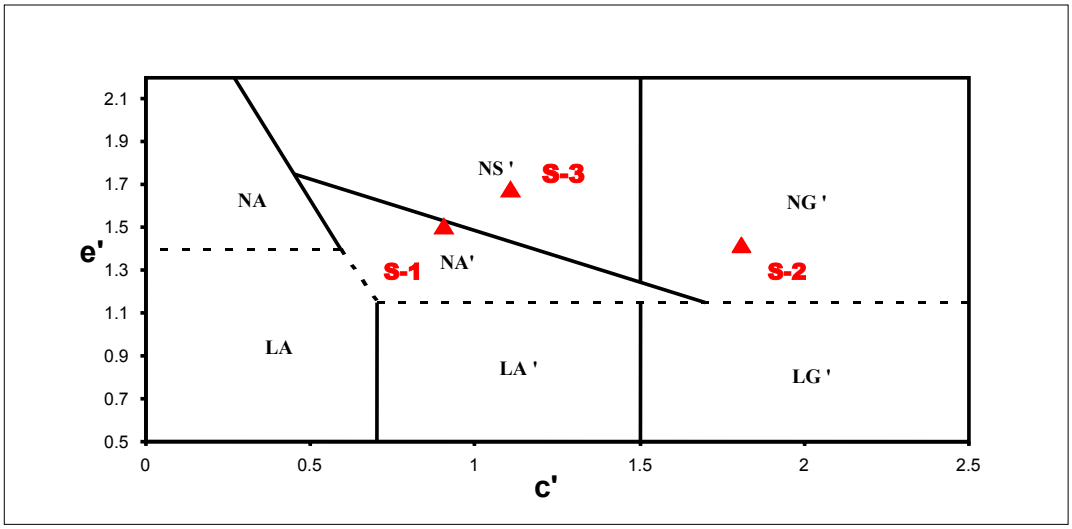


Figura 4.2 – Classificação dos três solos estudados.

Na Tabela 4.2 mostram-se os coeficientes resultantes do processamento de dados e a classificação dos solos definidos segundo a Metodologia como:

- Solo 1: NA' (Não Laterítico Arenoso)
- Solo 2: NG' (Não Laterítico Argiloso)
- Solo 3: NS' (Não Laterítico Siltoso)

Tabela 4.2 – Coeficientes resultantes do processamento de dados obtidos.

	Coeficientes			
	c'	D'	e'	Classe
Solo 1	1,01	27,8	1,47	NA'
Solo 2	1,81	31,2	1,42	NG'
Solo 3	1,17	17,9	1,59	NS'

4.2. Compactação

As curvas de Compactação pelo Proctor Normal mostradas na Figura 4.3, definem a umidade ótima de cada um dos solos utilizados neste estudo, assim como a sua densidade máxima. A umidade ótima tem uma grande importância, e foio alvo a ser alcançado na moldagem de todos os CPs de todos os CPs. No Solo 1 (NA'), a umidade ótima foi de 9,5% enquanto no Solo 2 (NG') foi de 19,5% e no Solo 3 (NS') de 14,2%.

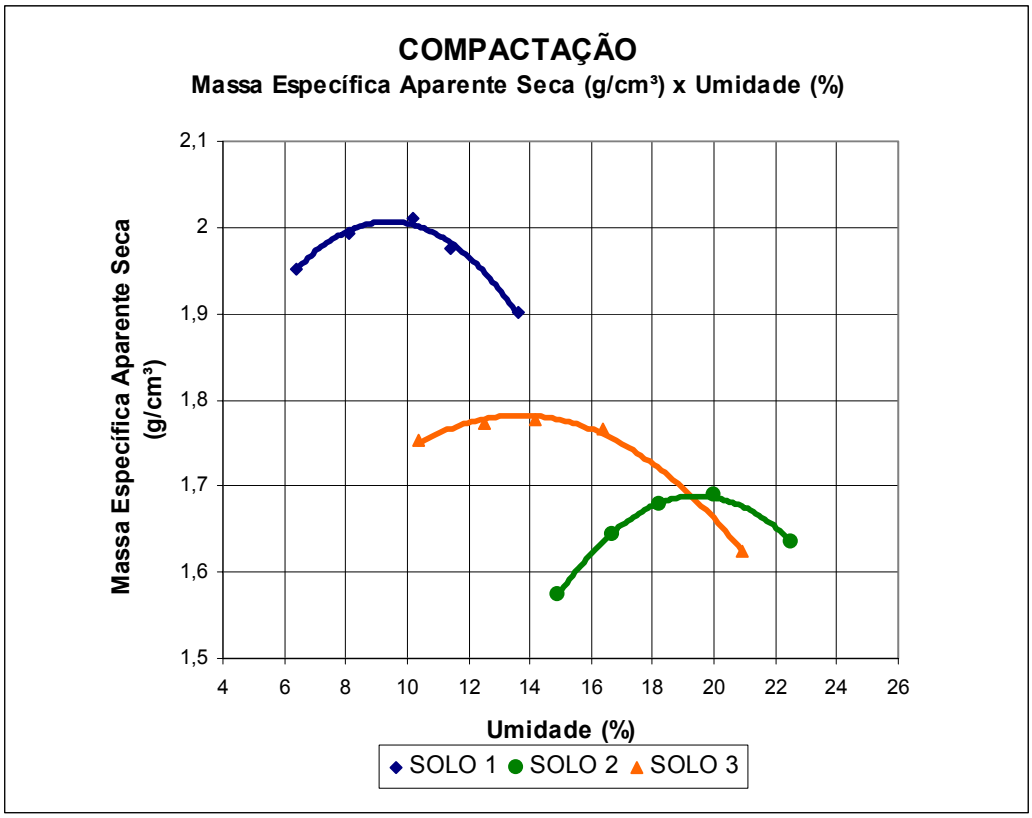


Figura 4.3 - Curvas de Compactação dos três tipos de solo deste estudo.

4.3. Resistência à compressão simples

Os ensaios de Resistência à compressão simples (RCS) foram realizados em Corpos-de-Prova moldados no cilindro Proctor com energia Normal. Foram moldados três CPs para cada teor de emulsão e também para os de solos puros.

Para fins comparativos, o valor médio da Resistência à compressão simples para cada teor de emulsão, foi comparado ao valor obtido com o solo sem emulsão asfáltica. A seguir, mostram-se os gráficos resultantes para cada solo, separadamente.

4.3.1. Solo 1 (NA')

Com o solo 1, primeiramente foram realizados ensaios de RCS com 7 dias de cura, para teores de 0, 2, 4 e 6% de emulsão do tipo RM-1C. Como se obtiveram resultados não favoráveis e a bibliografia indicava que para este tipo de solo (arenoso) os valores de emulsão deveriam ser menores, passou-se a ensaiar CPs com 1, 2 e 3% de RM-1C com tempos de cura de 7 e 28 dias, resultando na Figura 4.4.

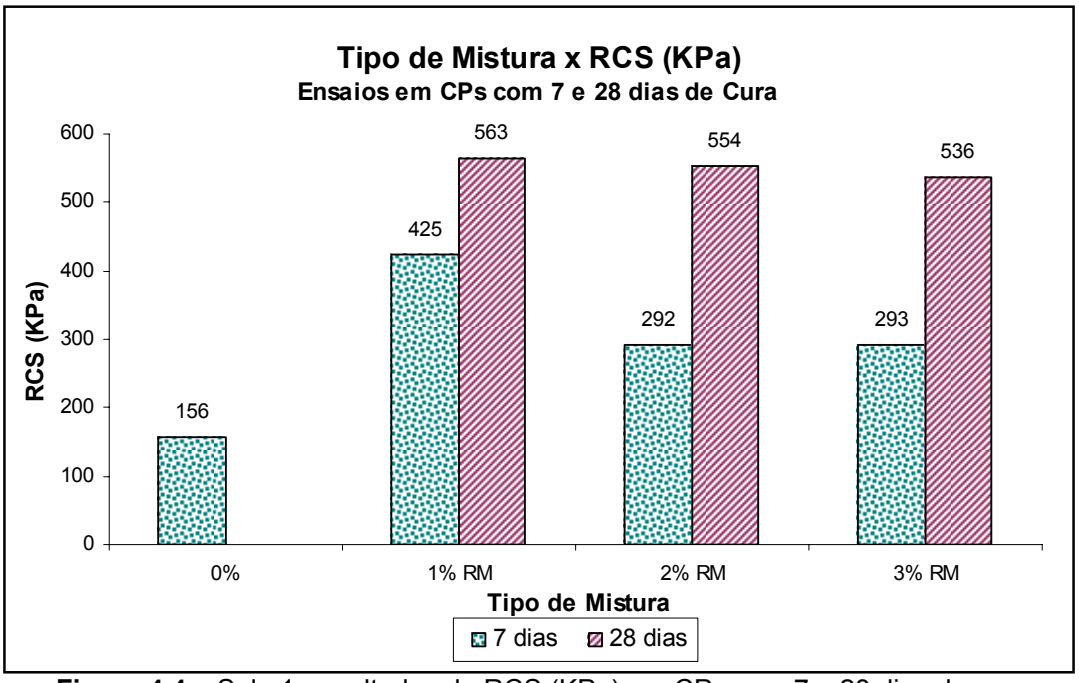


Figura 4.4 – Solo 1: resultados de RCS (KPa) em CPs com 7 e 28 dias de cura e emulsão RM-1C.

Na Figura 4.4 mostra-se que o teor de emulsão que apresenta maior valor de resistência a compressão simples para o Solo 1 é de 1% de RM-1C. com este teor o aumento da resistência é de 150% respeito ao solo sem emulsão. Para o tempo de cura de 28 dias ao ar o valor do módulo aumenta num 30% respeito ao solo com 7 dias de cura.

No início do programa experimental alguns CPs foram ensaiados após 56 dias de secagem ao ar, mas como foi dito no Capítulo 3, percebeu-se que não valia a pena aumentar o tempo de secagem porque o aumento de resistência devia-se mais à perda de umidade do que pela adição de emulsão, constatado em alguns casos e também por MICELI (2006). Assim deixou-se de realizar este passo nos estudos dos outros materiais.

A umidade de moldagem de todos os corpos-de-prova alcançou a umidade ótima requerida (9,5%) sendo a densidade máxima alcançada nos CPs em média igual a 1,75g/cm3. Já a umidade média de ensaio dependente do tempo de cura e foi de 3,4% para os CPs com 7 dias de cura e 1,2% para os CPs com 28 dias.

Na Figura 4.5, são mostrados os resultados de resistência à compressão simples obtidos em CPs para diferentes teores de emulsão com 7 dias de cura e dois tipos de emulsão: RM-1C e RL-1C.

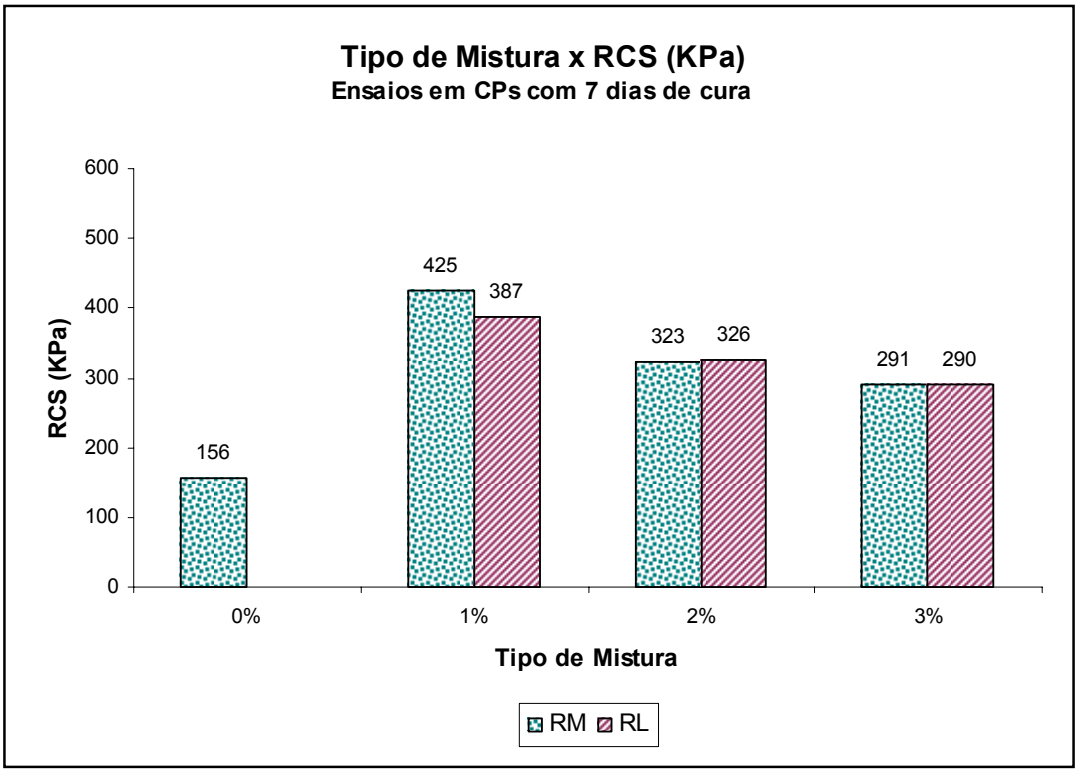


Figura 4.5 – Solo 1: resultados de RCS (KPa) em CPs com 7 dias de cura.

Observa-se neste gráfico (Figura 4.5) que ao se comparar a emulsão RM-1C e a RL-1C utilizadas nestes ensaios, obtêm-se uma pequena diferença do valor de RCS para o valor de 1% de emulsão, sendo que com a emulsão RL se obtêm um valor 24% menor do que com a RM, mas para os outros teores de emulsão não se obtem valores

diferentes, por tanto para o Solo 1 poderia ser indiferente o uso de qualquer tipo de emulsão. Também, verifica-se que o maior valor de resistência à compressão simples alcançado para o Solo 1 com diferentes tempos de cura ao ar, é com a adição de 1% de emulsão.

4.3.2. Solo 2 (NG')

No caso do Solo 2, os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados em CPs imediatamente após moldados (na hora) e CPs com 7 dias de cura somente.

Na Figura 4.6 apresenta-se um exemplo do aspecto destes CPs com a adição de emulsão asfáltica ensaiados imediatamente após moldagem (na hora) no fim do ensaio de RCS, e na Figura 4.7 mostram-se os resultados numéricos dos CPs ensaiados imediatamente após a moldagem.

Figura 4.6 – Exemplo do aspecto dos CPs de solo-emulsão ensaiados imediatamente após a moldagem.

Os Corpos-de-Prova do Solo 2, ensaiados logo após a moldagem (na hora), tiveram maior deformação axial do que os ensaiados após secagem e mostraram um "inchamento" (embarrigamento) quando aplicada a carga. As fissuras, em geral verticais, são claramente observadas na Figura 4.6, como exemplo do que ocorreu em todos os casos.

Como descrito no Capítulo 3, neste solo se fez o estudo da influência da forma de preparação do CP: com ou sem destorroar o que se vê refletido nos resultados da Figura 4.7.

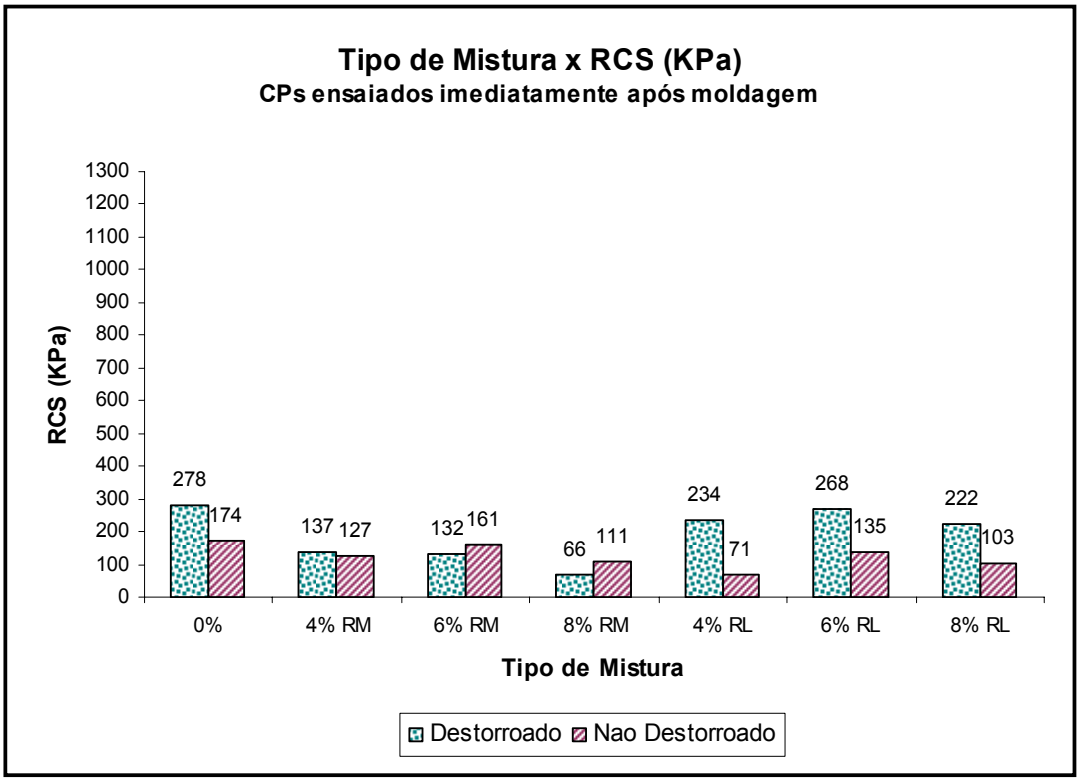


Figura 4.7 – Solo 2: resultados de RCS (KPa) em CPs moldados e ensaiados imediatamente, com ou sem destorroamento.

Neste gráfico (4.7) percebe-se que, como o Solo 2 é argiloso, já têm uma parcela de coesão, e a emulsão atua mais como lubrificante do solo, e não permite um aumento na resistência à compressão simples. A umidade de ensaios destes corpos-de-prova foi próxima à umidade ótima e alcançaram uma densidade máxima média foi 1,54g/cm^3.

Com relação ao solo estar destorroado ou não destorroado, e ao uso de emulsão RM ou RL-1C, nota-se um melhor comportamento com solos destorroados e com emulsão RL-1C, mas mesmo assim, esta melhora não supera a resistência alcançada com o solo puro. Por outro lado, o processo de preparação do solo tem certa influência nos resultados e no campo é difícil obter um bom destorroamento no processo de mistura in situ, conforme relatam MICELI (2006) e SANT'ANA et al (2007).

Na Figura 4.8, apresentam-se os resultados de resistência a compressão simples do Solo 2 em CPs com 7 dias de cura para as mesmas condições de preparação: com ou sem destorroamento so solo e emulsão RM e RL.

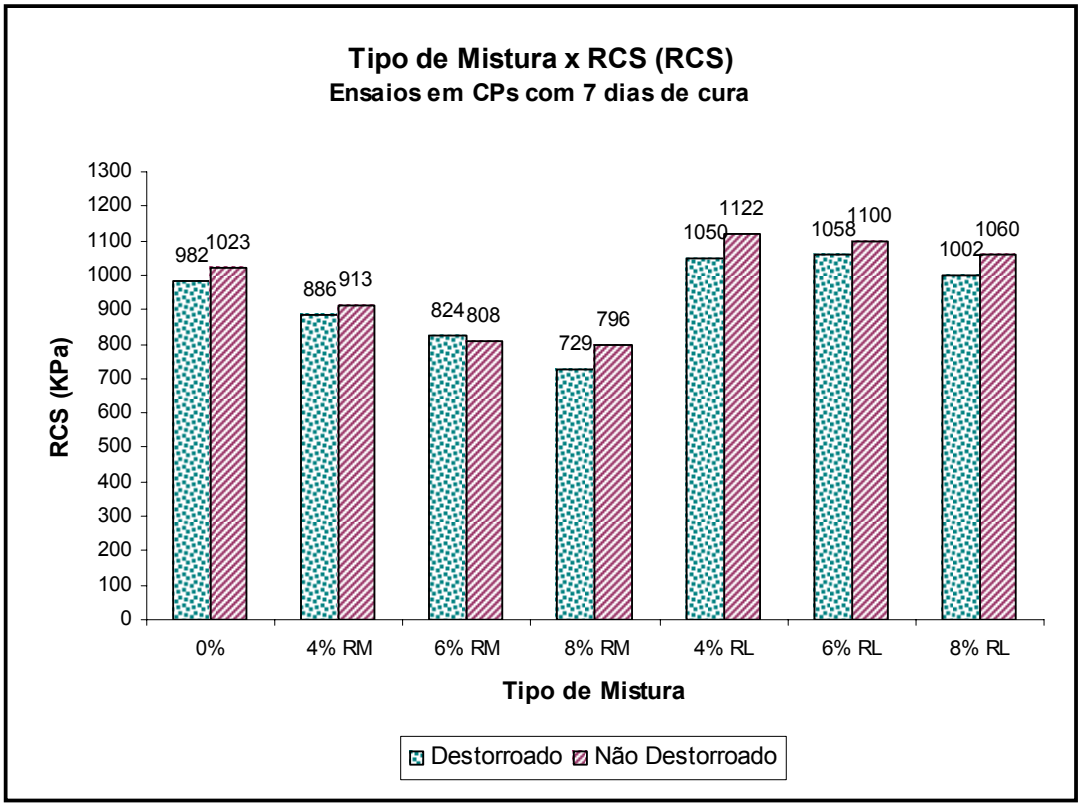


Figura 4.8 – Solo 2: resultados de RCS (KPa) em CPs com 7 dias de cura.

Nota-se que a cura de 7 dias favorece a melhoria da resistência do solo, sem e com emulsão, como esperado na caso de solo puro, sendo uma etapa necessária no processo de estabilização de solo com emulsões asfálticas. Dita melhoria (entre 7 e 9%) acontece no solo com a utilização de emulsão RL-1C para os diferentes teores ensaiados, obtendo-se um valor ligeiramente maior de RCS quando se adiciona 4% de RL-1C aos solos.

Um dado importante é que a umidade de ensaio média dos corpos de prova de solo destorroado é de 9,5% e a dos CPs de solo não destorroado é de 4,5% ao final do tempo de secagem.

4.3.3. Solo 3 (NS')

Para este tipo de solo areno - siltoso (NS'), também foram ensaiados CPs imediatamente após moldagem e CPs com 7 dias de cura ao ar livre, os resultados estão ilustrados nas Figuras 4.9 e 4.10, respectivamente, com ou sem destorroamento e com emulsões RM e RL.

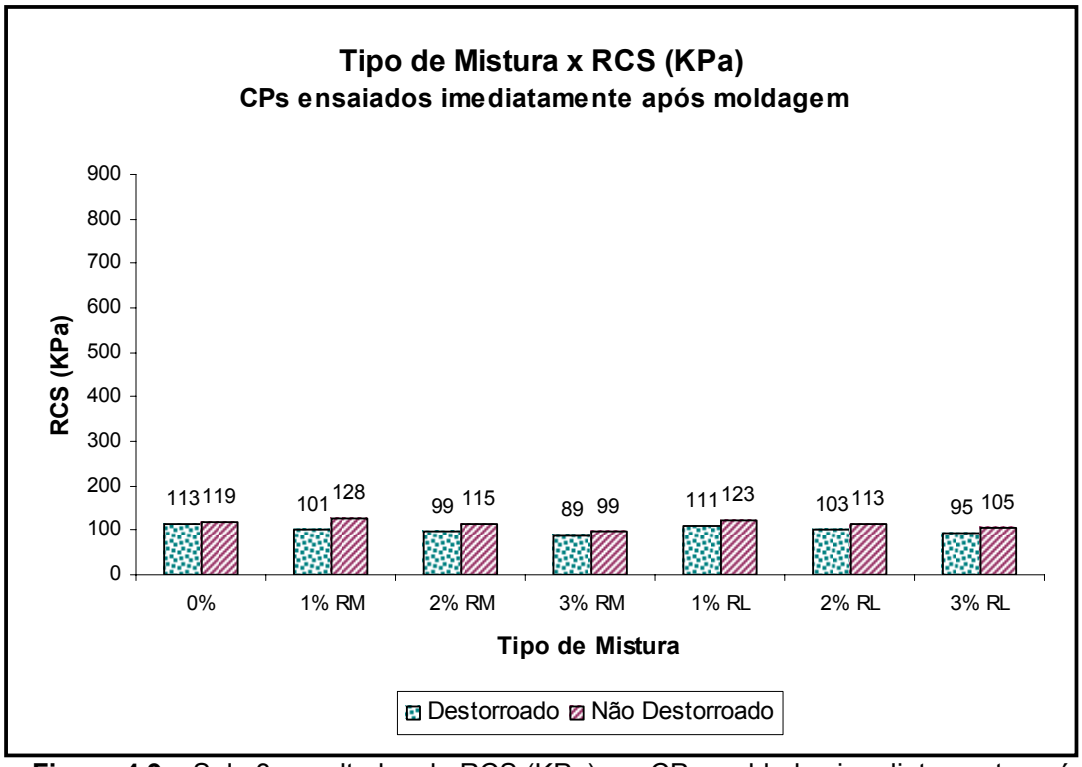


Figura 4.9 – Solo 3: resultados de RCS (KPa) em CPs moldados imediatamente após moldagem.

Nesta Figura 4.9, pode-se apreciar que com os solos destorroados não se consegue uma melhoria ao adicionar emulsão asfáltica, já no caso de solos não destorroados apresenta-se uma melhoria de 7% quando é adicionada uma percentagem de 1% de RM-1C.

A utilização de solos destorroados misturados com emulsões, seja RM-1C ou RL-1C, para os diferentes teores analisados, apresentam valores próximos e um pouco inferiores aos resultados dos solos ensaiados sem emulsões.

A densidade máxima média dos CPs, para a umidade ótima de compactação destes corpos de prova foi de 1,6g/cm^3.

Na Figura 4.10, apresentam-se os resultados após 7 dias de secagem, e percebe-se também que a cura favorece a melhoria de RCS do Solo 3, assim como foi visto com o Solo 2.

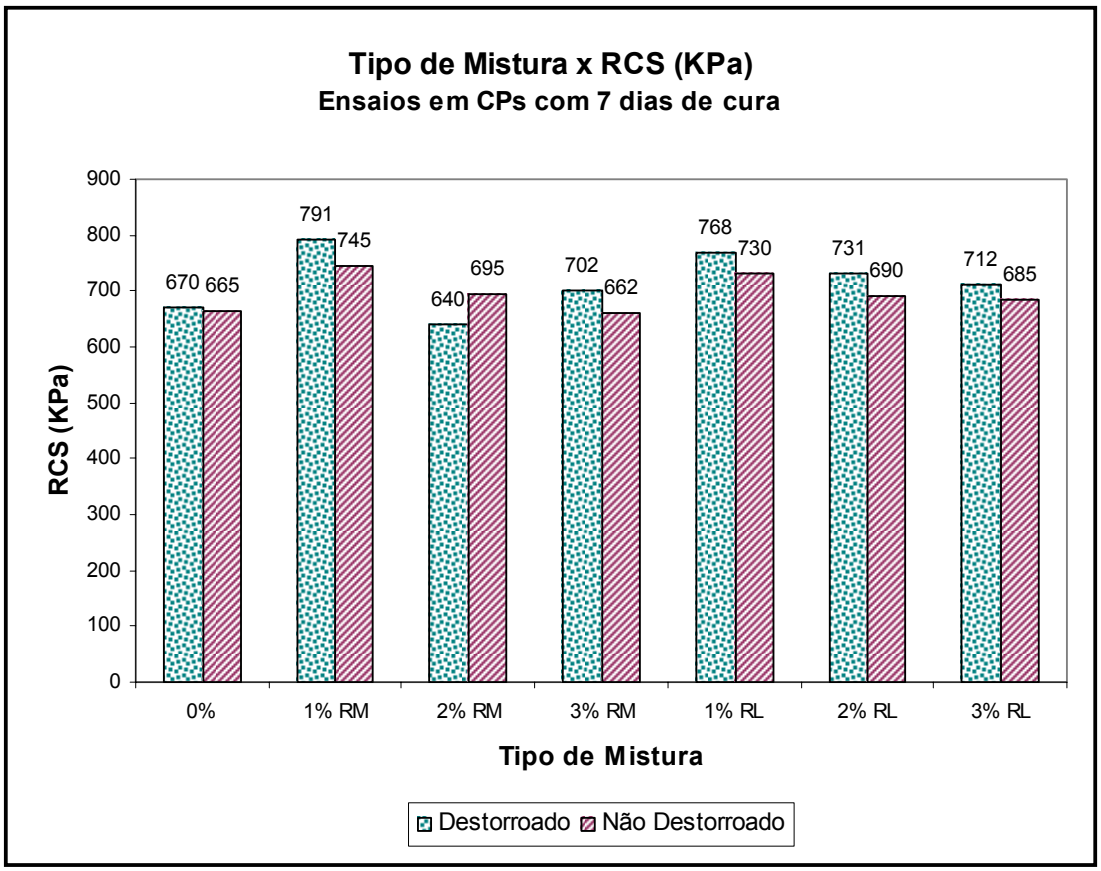


Figura 4.10 – Solo 3: resultados de RCS (KPa) em CPs com 7 dias de cura.

Repara-se, nesta figura, que para o teor de 1% de RM-1C obtêm-se os maiores valores de RCS (entre 12 e 18%), sendo que com a utilização de solo destorroado mostra-se um valor 6% maior do que com solo não destorroado.

Neste caso a umidade de ensaio dos CPs tanto para solos destorroados como de solos não destorroados foi de 2% ao final de 7 dias.

4.4. Triaxial dinâminco

Foram realizados ensaios triaxias dinâmicos em um corpo-de-prova para cada uma das condições variáveis de ensaio, tanto na primeira etapa quanto na segunda. Estas condições variáveis referem-se ao fato do solo estar ou não destorroado, ao tipo de emulsão utilizada e aos tempos de cura ao ar dos CPs.

A totalidade dos resultados destes ensaios encontra-se apresentado no anexo A. Como os resultados dos módulos em todos os casos foram não lineares, fica difícil analisar os gráficos para chegar a uma conclusão quanto a utilização de emulsão asfáltica na

estabilização de solos. Por isso, para fins de análises dos resultados optou-se por analisar os valores obtidos quando o CP estava submetido a uma tensão confinante e uma tensão desvio igual a 0,069MPa (a razão $\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = 2$) . Estes valores foram adotados considerando que com a possibilidade destes solos formarem a camada de base ou mesmo como possíveis revestimentos estariam submetidos a tensões relativamente altas. A razão

Não se escolheu um nível de tensão maior porque a maioria dos ensaios realizados imediatamente após moldagem não puderam ser concluídos, especialmente os CPs do Solo 2 (NG').

Os teores utilizados na moldagem dos CPs são os mesmos utilizados nos ensaios de RCS para os diferentes tipos de solo. Estão ilustrados nas Figuras 4.11 a 4.18 os resultados obtidos com estes solos, separadamente.

4.4.1. Solo 1

Na primeira etapa, o Solo 1 (granular, areia pedregulhosa) foi ensaiado com a adição de percentagens de emulsão do tipo RM-1C para tempos de cura de 7, 28 e 56 dias, como mostra a Figura 4.11.

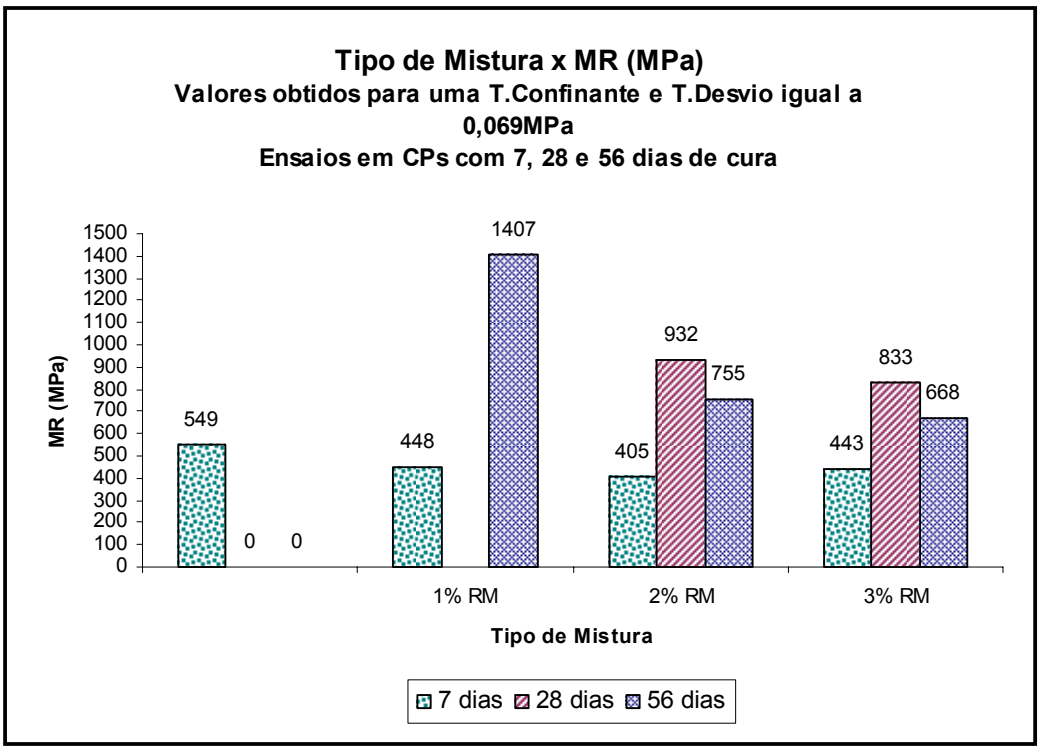


Figura 4.11 – Solo 1: resultados de MR (MPa) de CPs com 7, 28 e 56 dias cura.

Tal como aconteceu com os resultados obtidos nos ensaios de RCS com tempos de cura de 7 e 28 dias, nota-se uma melhoria no comportamento do solo à medida que o tempo de cura aumenta e volta-se a repetir o que tinha-se falado anteriormente nos ensaios de RCS: que este aumento é mais devido à perda de umidade do CP com o tempo de cura do que com adição de emulsão asfáltica.

Um detalhe importante em CPs com 28 e 56 dias de cura ao ar foi que a medida que o tempo passava, os CPs apresentavam uma deterioração aparentemente pela ação do ambiente que ia desintegrando os CPs.

Verificou-se que as umidades de moldagem dos CPs são aproximadamente iguais a 9,5%, e densidade média de 2,2g/cm3. Em relação à umidade de ensaio dos CPs deixados em cura, obtiveram-se os seguintes valores médios:

- CPs com 7 dias de cura ao ar: 3%
- CPs com 28 dias de cura ao ar: 1,5%
- CPs com 56 dias de cura ao ar: 0,7%

Observando a Figura 4.11 onde estão os resultados obtidos na primeira etapa da pesquisa, com estes ensaios, aprecia-se que a adição de emulsão ao solo 1 deixado 7 dias de cura, não melhora seu comportamento em relação ao MR.

Uma vez definidos os ensaios a serem realizados na segunda etapa, passou-se a realizar novamente os ensaios com CPs deixados em cura ao ar por 7 dias e além disso fizeram-se ensaios com CPs ensaiados imediatamente após moldados (na hora). Neste caso, pela falta de material, optou-se por moldar CPs somente com 1 e 2% das emulsões trabalhadas.

Os resultados dos ensaios com CPs ensaiados imediatamente após moldagem são apresentados na Figura 4.12, na qual pode-se apreciar que existe uma melhoria de 30% no comportamento quando é adicionada 1% de emulsão RM-1C ao solo.

Na Figura 4.13 mostram-se os ensaios com 7 dias de cura ao ar. Estes ensaios foram repetidos na segunda etapa, e neste caso notou-se uma melhoria com a adição de emulsão.

Existem uma diferença quando analiza-se os teores ótimos respeito a RCS e triaxial dinêmico. Neste caso o teor de emulsão ótimo é de 2% de RM-1C, enquanto que para RCS o teor adotado com “ótimo” é o que se obtêm com 1% de RM-1C.

Outra diferença que se notou considerando os ensaios imediatos e os ensaios com 7 dias de cura é que a adição de 2% de emulsão RM-1C melhora mais de 100% quando deixada ao ar, neste estágio do ensaio.

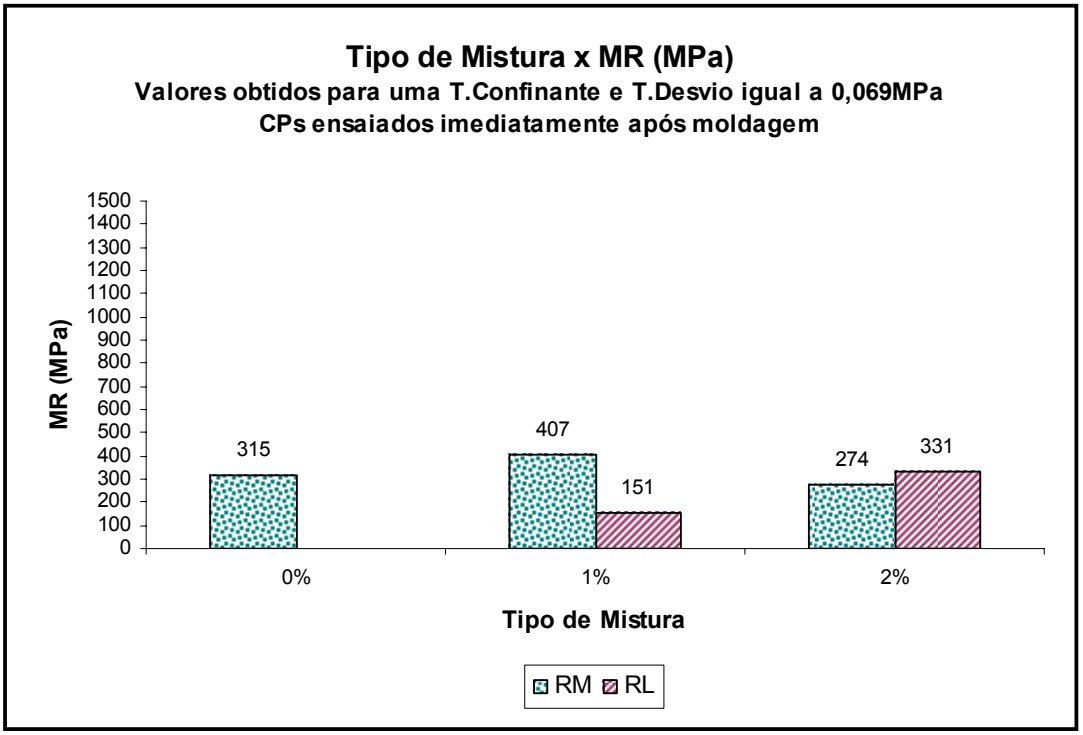


Figura 4.12 – Solo 1: resultados de MR (MPa) de CPs ensaiados imediatamente após moldagem.

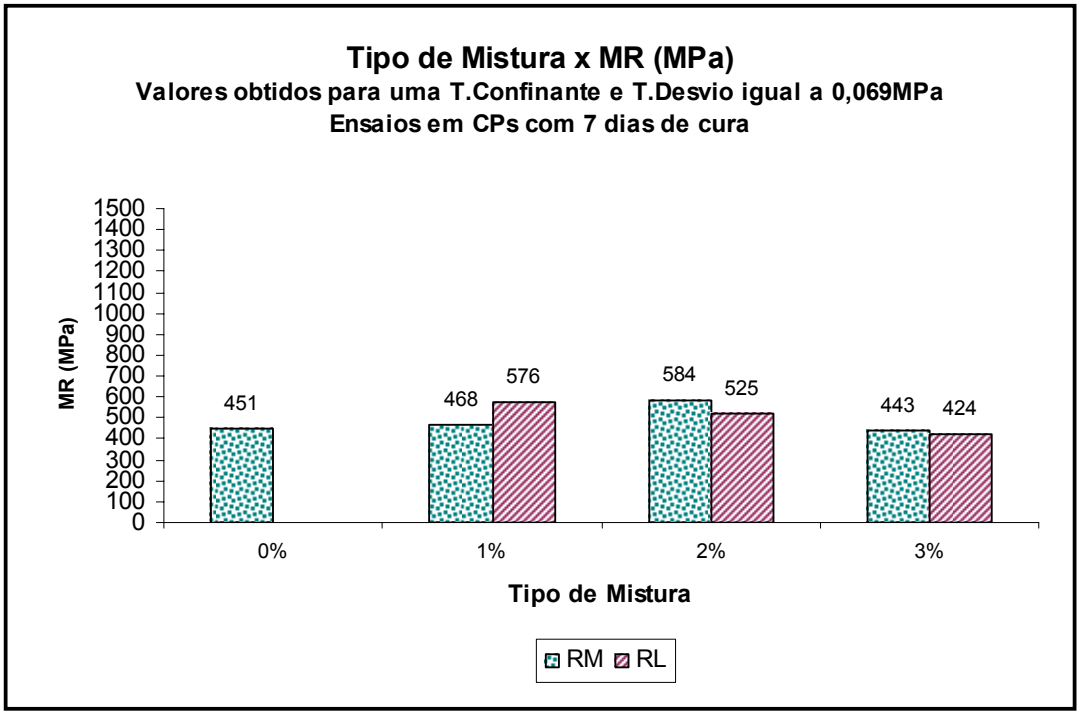


Figura 4.13 – Solo1: resultados de MR (MPa) de CPs com 7 dias de cura

Na Tabela 4.3 são mostrados os modelos de comportamento tensão – deformação obtidos em todas as condições de moldagem descritas para o Solo 1. No Anexo A são mostrados gráficos comparativos destas condições utilizando-se somente o modelo em função da tensão desvio por facilidade de representação.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios dinâmicos do Solo 1 em todas as condições de moldagem.

Condição de moldagem	Tipo de emulsão	Condição de ensaio	k_1	k_2
0%	-	Imediato	222,9	-0,0522
1%	RM	Imediato	163,1	-0,2138
2%	RM	Imediato	172,1	-0,1012
1%	RL	Imediato	274,7	0,2184
2%	RL	Imediato	160,8	-0,1535
0%	-	Imediato (*)	185,8	-0,1169
0%	-	7 dias (*)	358,1	-0,2286
1%	RM	7 dias (*)	502,3	0,0619
1%	RM	56 dias (*)	399,8	-0,3004
2%	RM	7 dias (*)	405,6	0,0232
2%	RM	28 dias (*)	539,8	-0,1227
2%	RM	56 dias (*)	466,7	-0,1215
3%	RM	7 dias (*)	327,2	-0,0619
3%	RM	28 dias (*)	556,2	-0,0969
0%	-	7 dias	569,2	0,1589
1%	RM	7 dias	577,1	0,1303
2%	RM	7 dias	505,7	0,0277
3%	RM	7 dias	327,2	-0,0619
1%	RL	7 dias	538,3	0,0515
2%	RL	7 dias	402,9	-0,0325
3%	RL	7 dias	256,3	-0,1433

* Ensaios realizados na primeira etapa.

4.4.2. Solo 2

De forma geral, os CPs do Solo 2 (argiloso não laterítico) homogeneizados e submetidos a ensaios triaxiais dinâmicos imediatamente após a moldagem, não apresentam melhorias sendo necessário neste tipo de solo deixar os CPs em cura ao ar dentro do laboratório.

Uma observação importante a se fazer é que na hora da mistura dos CPs para a realização destes ensaios foi mais difícil alcançar a umidade ótima, oscilando a umidade de moldagem entre 18% e 21% mas mesmo assim os CPs alcançaram uma massa específica média de 1,9g/cm3.

Não foi possível concluir o ensaio de alguns CPs por terem sofrido grandes deformações na fase de condicionamento e, por isso, sua ausência é notada na Figura 4.14. Uma vez terminado o ensaio estes CPs apresentavam deformações muito maiores que os CPs ensaiados com 7 dias de cura ao ar, como se observa na Figura 4.15, como exemplo.

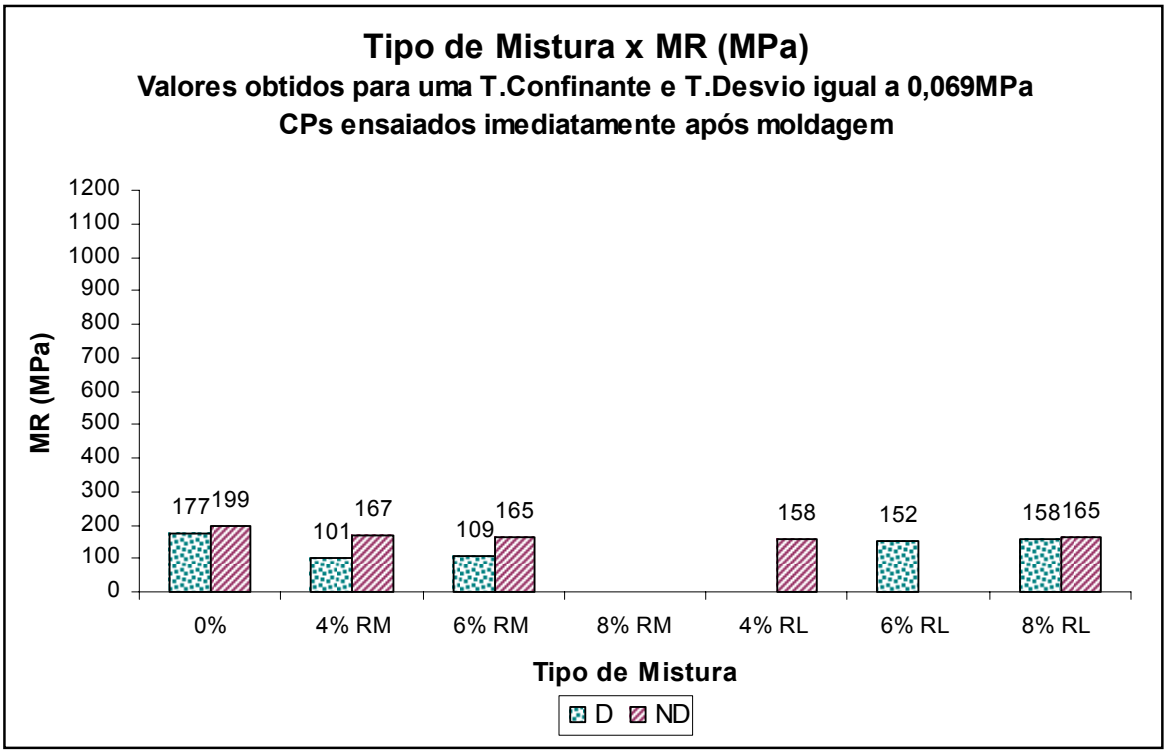


Figura 4.14 – Solo 2: resultados de MR (MPa) de CPs ensaiados imediatamente após moldagem.

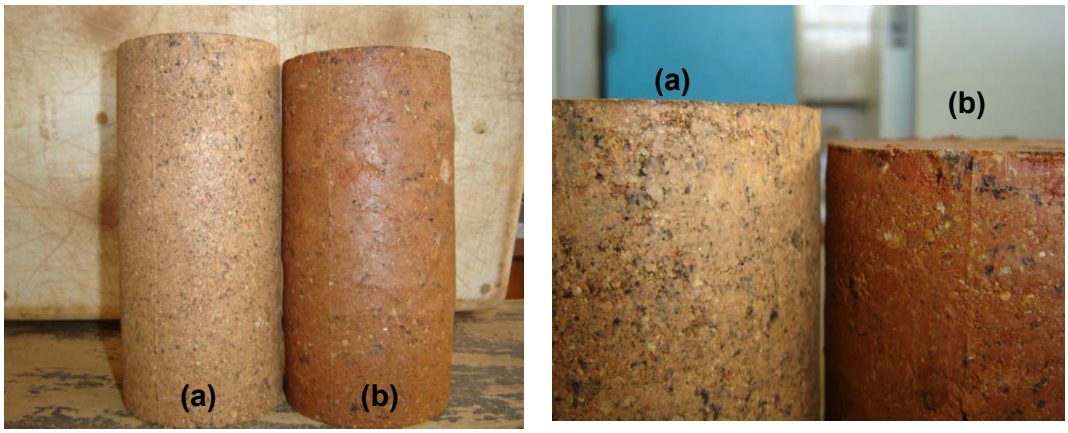


Figura 4.15 – Solo 2: Exemplo de diferença de deformação entre os CPs com 7 dias de cura ao ar (a) e CPs ensaiados imediatamente após moldagem (b).

Os CPs deixados em cura de 7 dias, mostraram um comportamento melhor do que no caso de ensaios realizados imediatamente após moldagem, como é ilustrado na Figura 4.16.

Observa-se no gráfico 4.16 que os valores maiores num 40% respeito ao CP de solo puro analisando este estágio acontecem quando se adiciona ao Solo 2 (NG') destorroado ou não, uma percentagem de emulsão de 8%, sendo esta RM-1C ou RL-1C.

O teor de 8% de emulsão foi adotado como o teor ótimo para este tipo de solo depois de verificar que em CPs com 10% de emulsão RM e RL-1C para solos destorroados e não destorroados que o valor do módulo diminui.

Também nota-se que nos CPs aos quais são adicionados teores de emulsão RL-1C tiveram melhor comportamento do que os que contêm emulsão RM-1C, e que ao trabalhar este solo não destorroado obtêm-se melhores resultados do que com o solo destorroado.

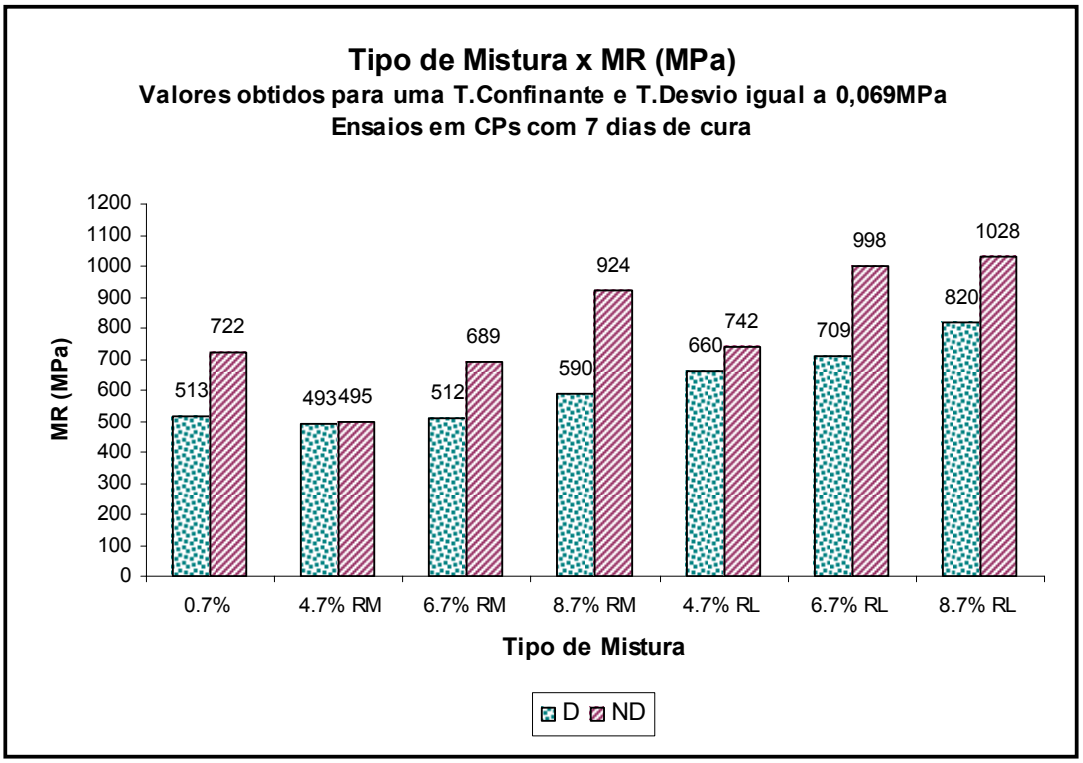


Figura 4.16 – Solo 2: resultados de MR (MPa) de CPs com 7 dias de cura.

Na Tabela 4.4 são mostrados os modelos de comportamento tensão – deformação obtidos em todas as condições de moldagem descritas para o Solo 2. No Anexo B são mostrados gráficos comparativos destas condições.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios dinâmicos do Solo 2 em todas as condições de moldagem.

Condição de moldagem	Tipo de emulsão	Condição de ensaio	k_1	k_2
0% D	-	Imediato	39	-0,418
4% D	RM	Imediato	16,9	-0,5463
6% D	RM	Imediato	13,3	-0,582
8% D	RM	Imediato	44,5	-0,0164
4% D	RL	Imediato	9	-0,5055
6% D	RL	Imediato	29,6	-0,6019
8% D	RL	Imediato	19,9	-0,7965
0% ND	-	Imediato	40,2	-0,5665
4% ND	RM	Imediato	14,3	-0,91
6% ND	RM	Imediato	21,6	-0,5823
8% ND	RM	Imediato	4,8	-1,0572
4% ND	RL	Imediato	12,3	-0,7461
6% ND	RL	Imediato	26,3	-0,3036
8% ND	RL	Imediato	28,1	-0,5174
0% D	-	7 dias	571,2	0,0818
4% D	RM	7 dias	412,9	-0,0361
6% D	RM	7 dias	577,7	0,1098
8% D	RM	7 dias	260	-0,2611
4% D	RL	7 dias	664,1	0,0491
6% D	RL	7 dias	618,1	0,0519
8% D	RL	7 dias	828,6	0,0855
0% ND	-	7 dias	491,1	-0,0574
4% ND	RM	7 dias	639,5	0,1281
6% ND	RM	7 dias	649,9	0,0577
8% ND	RM	7 dias	337,7	-0,2953
4% ND	RL	7 dias	452,9	-0,1134
6% ND	RL	7 dias	494,7	-0,1668
8% ND	RL	7 dias	592,3	-0,1046

4.4.3. Solo 3

Os ensaios realizados no solo 3 (NS') imediatamente após a moldagem, apresentam melhor comportamento em relação aos ensaios em corpos-de-prova com 7 dias de cura, dita melhoria representa um 50% respeito ao solo puro.

Na Figura 4.17 mostram-se resultados dos ensaios realizados imediatamente após moldagem, que apresentaram uma massa específica média de 2g/cm^3. Para este tipo de solo considera-se que o teor ótimo de adição ao solo para estabilização com emulsão é de 1% de RM-1C para solo destorroado e 3% de RM-1C para o solo não destorroado.

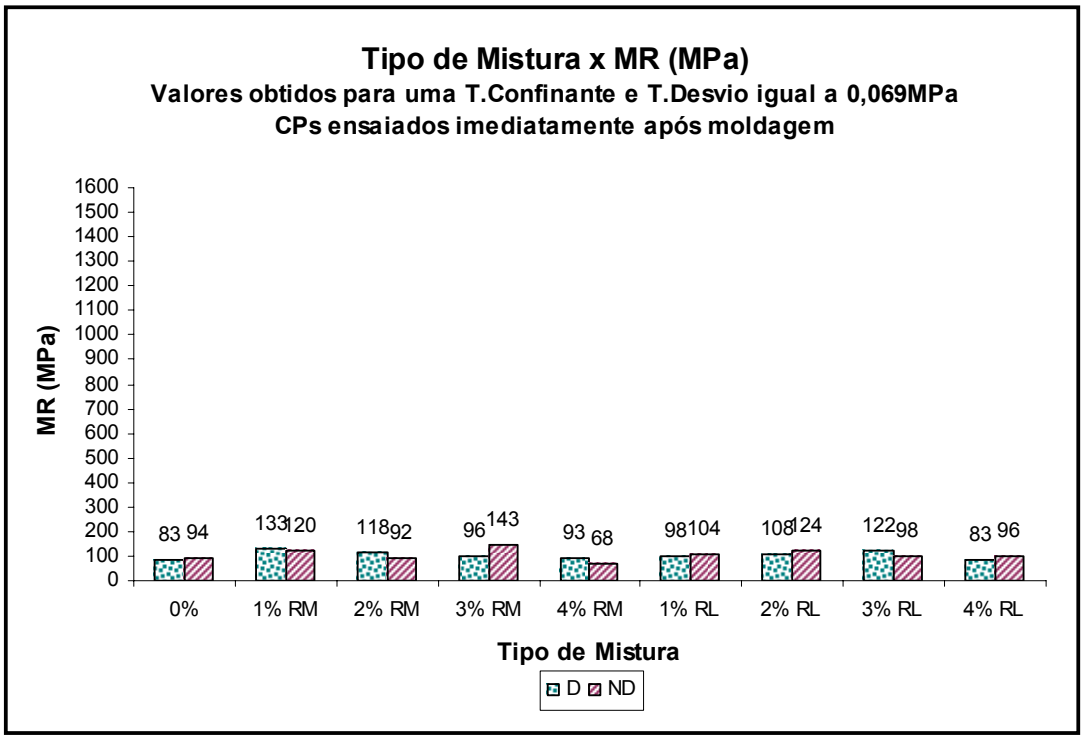


Figura 4.17 – Solo 3: resultados de MR (MPa) de CPs ensaiados imediatamente após moldagem.

Com os ensaios realizados com CPs com 7 dias de cura ao ar, obteve-se o gráfico da Figura 4.18, no qual pode-se perceber que a tendência do módulo com o uso de emulsão asfáltica é de diminuir com o aumento do teor de emulsão seja nos solos destorroados ou não destorroados.

Porém no caso do solo destorroado misturado com 1% de emulsão RM-1C, obteve-se uma melhoria significativa no valor de módulo de resiliência neste estágio, este valor, no caso, é considerado como o teor ótimo para os CPs com 7 dias de cura ao ar.

Quanto a umidade de ensaio, os CPs ensaiados apresentavam uma umidade média de 2,4% ao final da secagem por 7 dias.

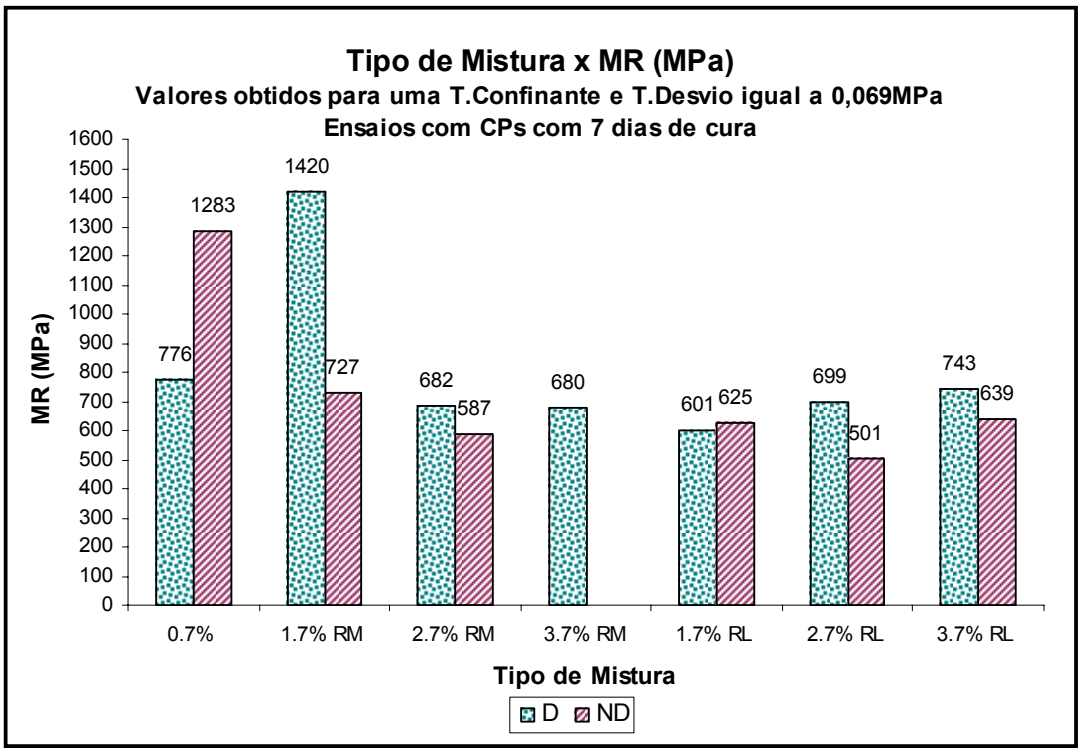


Figura 4.18 – Solo 3: resultados de MR (MPa) de CPs com 7 dias de cura.

Na Tabela 4.5 são mostrados os modelos de comportamento tensão – deformação obtidos em todas as condições de moldagem descritas para o Solo 3. No Anexo C são mostrados gráficos comparativos destas condições.

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios dinâmicos do Solo 3 em todas as condições de moldagem.

Condição de moldagem	Tipo de emulsão	Condição de ensaio	k_1	k_2
0% D	-	Imediato	93,1	0,0635
1% D	RM	Imediato	61,3	-0,2157
2% D	RM	Imediato	92	-0,0178
3% D	RM	Imediato	42,7	-0,2347
4% D	RM	Imediato	137,1	0,2129
1% D	RL	Imediato	110,2	0,0980
2% D	RL	Imediato	91,6	-0,0145
3% D	RL	Imediato	48,6	-0,2936
4% D	RL	Imediato	130	0,1787
0% ND	-	Imediato	141,3	0,1912
1% ND	RM	Imediato	75,8	-0,1102
2% ND	RM	Imediato	107,5	0,1071
3% ND	RM	Imediato	44,3	-0,3628
4% ND	RM	Imediato	76,2	0,0958
1% ND	RL	Imediato	86	-0,0500
2% ND	RL	Imediato	101,4	-0,0152
3% ND	RL	Imediato	40,3	-0,4835
4% ND	RL	Imediato	87,8	0,0174
0% D	-	7 dias	429,3	-0,1099
1% D	RM	7 dias	556	-0,0673
2% D	RM	7 dias	653,5	0,0672
3% D	RM	7 dias	476,7	-0,0308
1% D	RL	7 dias	656,6	0,0994
2% D	RL	7 dias	705,7	0,1197
3% D	RL	7 dias	533,6	-0,0306
0% ND	-	7 dias	194,2	-0,5512
1% ND	RM	7 dias	358,2	-0,1982
2% ND	RM	7 dias	639,4	0,1202
3% ND	RM	7 dias	-	-
1% ND	RL	7 dias	513,3	0,0181
2% ND	RL	7 dias	881,5	0,2709
3% ND	RL	7 dias	521,7	0,0118

4.5. Absorção

Como explicado no Capitulo 3, na seção 3.6.2 assim que concluíam os ensaios triaxiais, os CPs eram pesados e deixados em contato com água para se avaliar a absorção durante 48 horas. Após este tempo, os CPs eram envolvidos em papel filme e deixados durante 24 horas na câmara úmida e depois disso, eram levados para ser ensaiados novamente.

Nem todos os corpos-de prova conseguiram ser ensaiados após a absorção. Quando se percebia que não agüentariam a fase de condicionamento ou quando eles se mostravam

muito frágeis, restringiu-se a pesá-los para saber a quantidade de absorção que alcançaram e depois foram descartados.

No andamento dos ensaios, percebeu-se que a absorção não era homogênea em todo o CP, logicamente era maior na base do CP e também se observou que no topo do CP existia uma perda de umidade. Os resultados encontram-se detalhados a seguir.

4.5.1. Solo 1

Existiu uma diferença na medição da absorção em CPs com 7 dias de cura e com os que tiveram 28 e 56 dias de cura.

No caso dos CPs com 7 dias, adotou-se a medida da absorção no CP inteiro, mas observou-se que a água absorvida era maior na base do que no topo, por isso, passou-se a cortar os CPs em 3 partes, e a medir a quantidade de água em cada uma destas partes.

Os resultados obtidos, com os valores médios de absorção são os seguintes:

- Os CPs com 7 dias de cura, que na hora do ensaio após secagem apresentavam uma umidade de 3% alcançam uma umidade de 6,8%ao fim da absorção; ou seja absorveram 3,8% de água
- Os CPs com 28 dias de cura que estavam com 1,5% de umidade na hora do ensaio (seco), após a absorção estes CPs alcançaram uma umidade de 4,3% (2,8% de absorção), sendo que no topo do CP apresentavam uma umidade de 1,8%, no meio do CP uma umidade de 3,5% e na base uma umidade de 7,6%
- Os CPs com 56 dias de cura que tinham 0,7% de umidade na hora do ensaio (seco), chegarom a uma umidade de 4,6% no conjunto, sendo que apresentaram uma umidade de 1,1% no topo do CP, 4,5% no meio e 8,1% na base.

Na Figura 4.19, tem-se os resultados de módulo de resiliência dos CPs que conseguiram terminar o ensaio triaxial após 48 horas de absorção.

Na Figura 4.19 verifica-se que à medida que os CPs são deixados mais tempo em cura ao ar o módulo de resiliência tende a diminuir mais neste estágio de análise tomando em conta que todos os CPs foram submetidos ao mesmo tempo de absorção. Com isso, verifica-se nas Figuras 4.19 e 4.21, que nos corpos-de-prova com 7 dias de cura esta diminuição no módulo não é tão grande o que faz concluir que não adianta mesmo deixar os corpos-de-prova durante maior tempo de cura ao ar.

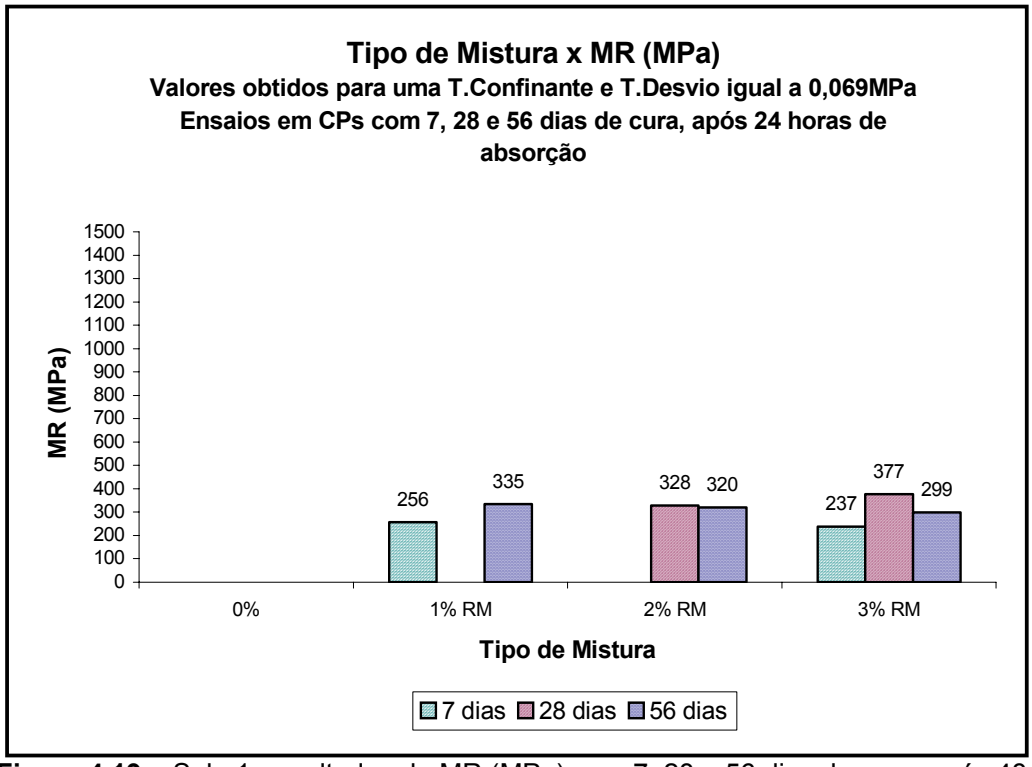


Figura 4.19 – Solo 1: resultados de MR (MPa) com 7, 28 e 56 dias de cura, após 48 horas de absorção.

A Figura 4.20 mostra os ensaios realizados em CPs ensaiados imediatamente após moldagem, deixados 48 horas em absorção. Neste caso, como se podem observar os valores do módulo caíram aproximadamente um 50% respeito ao valor alcançado antes da absorção.

No caso dos solos com 7 dias de cura o valor do módulo diminui, mas só num 20% respeito aos valores alcançados antes de serem submetidos à absorção.

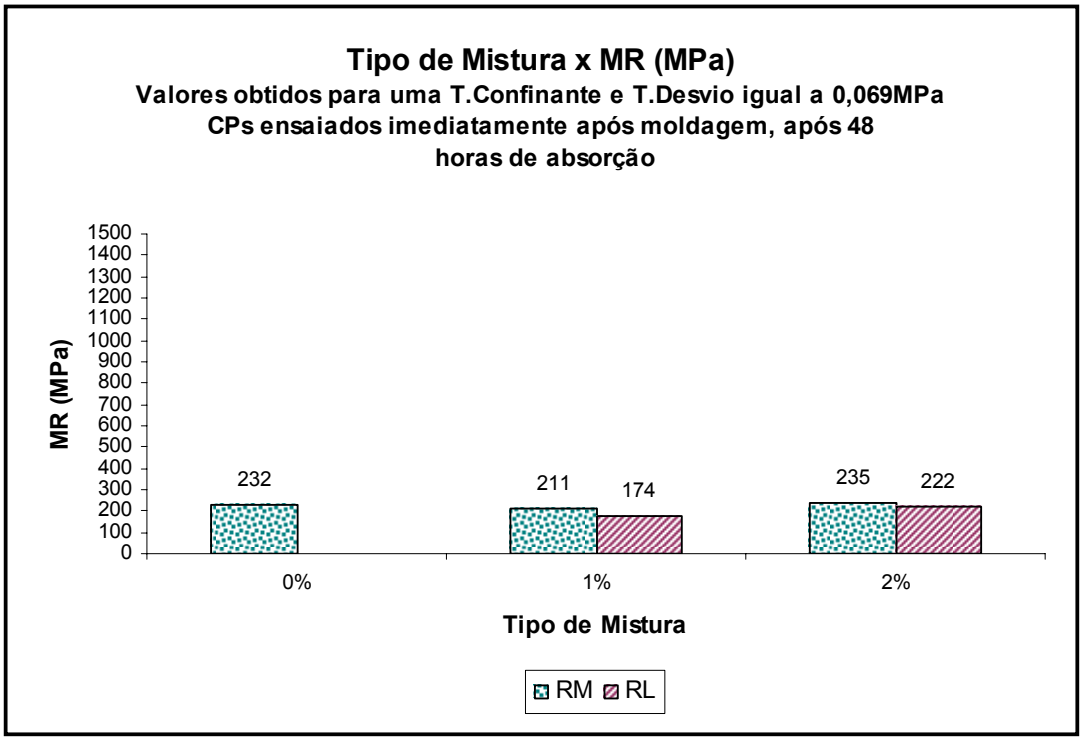


Figura 4.20 – Solo 1: resultados de MR (MPa) de CPs ensaiados imediatamente após a moldagem, após 48 horas de absorção.

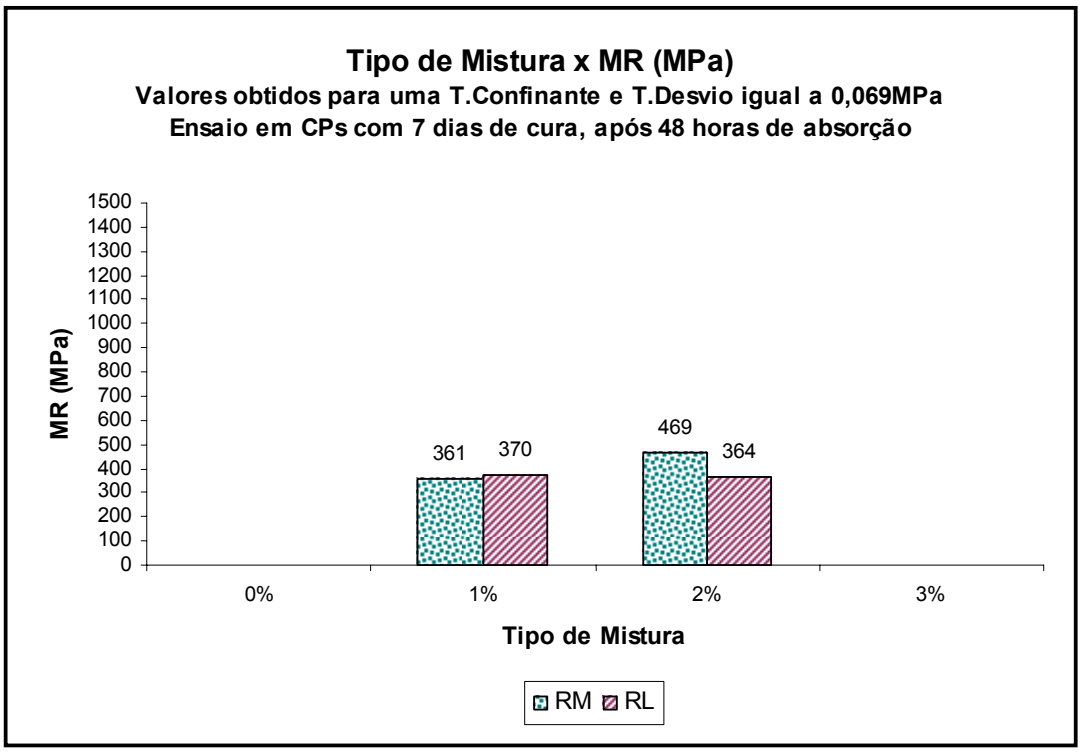


Figura 4.21 – Solo 1: resultados de MR (MPa) de CPs com 7 dias de cura, após 48 horas de absorção.

4.5.2. Solo 2

Tomando em conta que os CPs do Solo 2 (NG') submetidos à absorção continham 6% de umidade, após absorção, resultou nos seguintes valores:

- O CP de solo destorroado sem emulsão, apresentou uma absorção de 16,78% no topo, 23,2% no meio e 25,5% na base.
- Os CPs de solo destorroado misturados com emulsão tinham uma umidade de 12,9% no topo, 17,8% no meio e 19,8% na base.
- Os CPs de solo não destorroado apresentaram uma umidade de 4,2% no topo, 10,8% no meio e 15,4% na base.

Estes resultados apontam uma menor absorção de água devido ao maior teor de emulsão com que este tipo de solo é estabilizado. Apresentam na maioria dos casos uma diminuição de entre 2 e 5% no módulo de resiliência no estágio analisado quando misturados com o teor considerado como ótimo (8%, seja RM ou RL-1C).

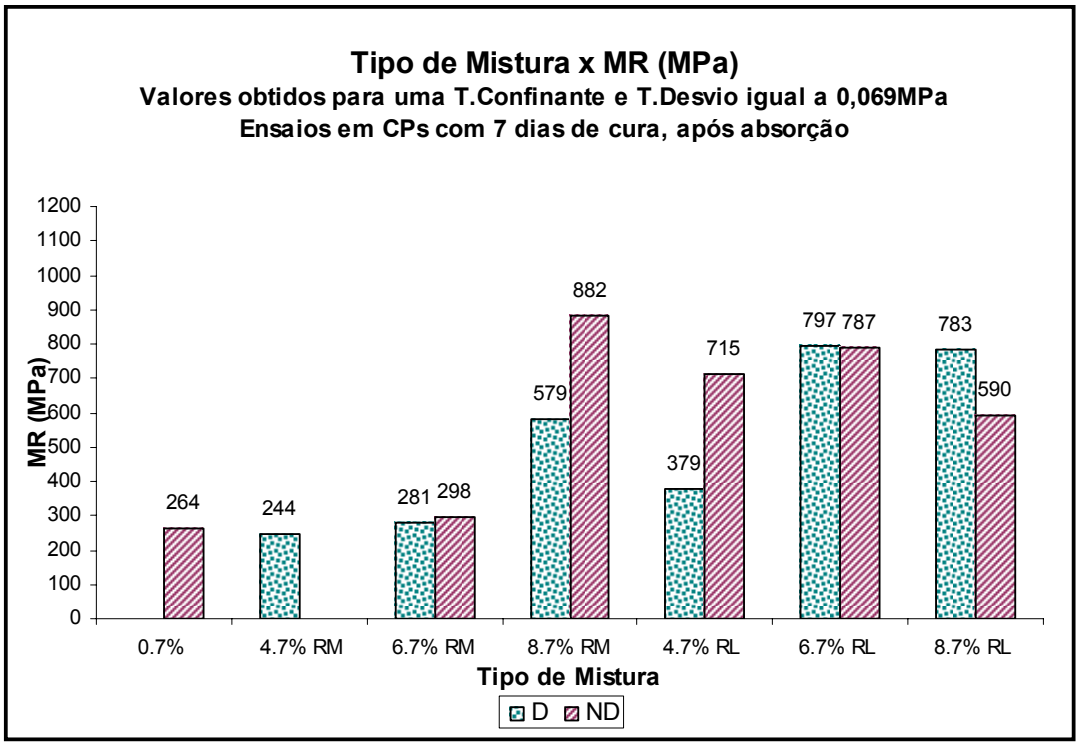


Figura 4.22 – Solo 2: resultados de MR (MPa) de CPs com 7 dias de cura, após 48 horas de absorção.

4.5.3. Solo 3

Os resultados obtidos com os CPs do solo 3 (NS') não foram muito satisfatórios, já que depois de serem submetidos ao ensaio de absorção mostraram-se muito frágeis, como no exemplo apresentado na Figura 4.23. Estes CPs, absorveram água mais do que

suficiente para serem marcados pela unha ou mesmo até romper na hora de serem pesados após 24 horas de absorção, no caso de CPs ensaiados imediatamente após moldagem. No caso dos solos com cura ao ar de 7 dias isto aconteceu com alguns CPs, os que não romperam foram submetidos a ensaios triaxial sendo que nem todos passaram da fase de condicionamento.

Figura 4.23 – Solo 3: Exemplos de CPs que romperam após a absorção de água, antes do ensaio triaxial.

Na Figura 4.24, mostram-se os resultados conseguidos com os CPs com 7 dias de cura ao ar após a absorção de água, sendo que a maioria dos CPs que conseguiram terminar o ensaio foram CPs de solo não destorroado, moldados com diferentes teores de emulsão.

Neste caso nota-se que pelo fato dos teores serem baixos, a emulsão não funciona como impermeabilizante do solo, os valores do módulo diminuem entre 80 e 85% no estágio analisado.

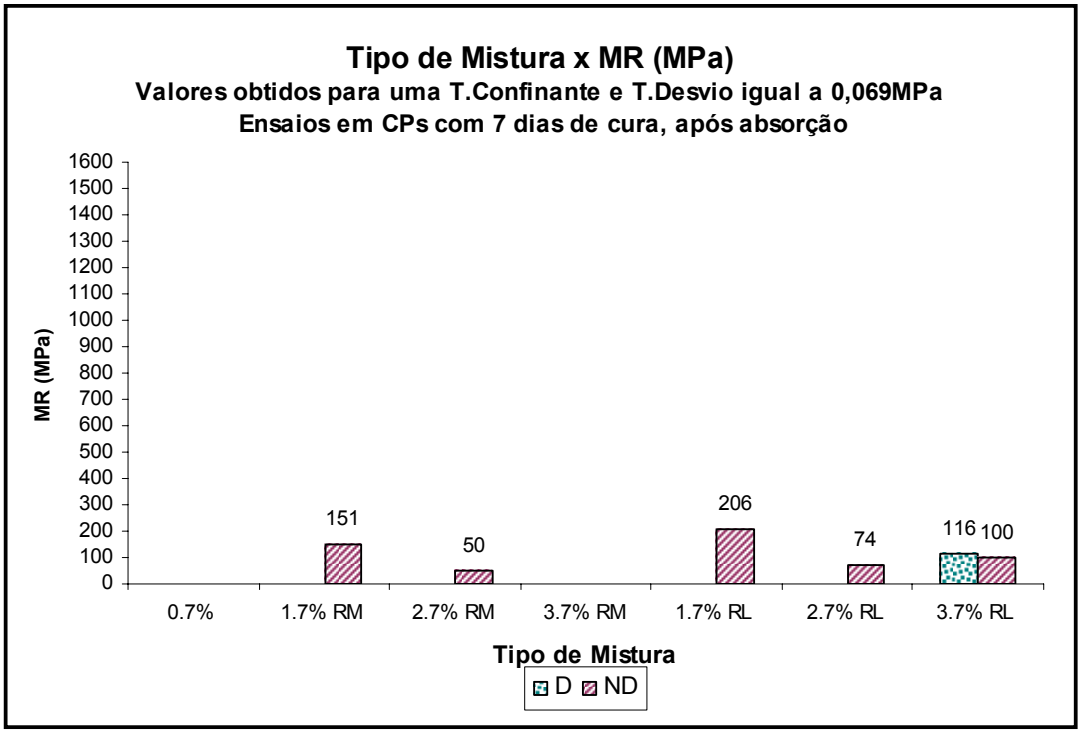


Figura 4.24 – Solo 3: resultados de MR (MPa) de CPs com 7 dias de cura, após absorção de água.

A tabela 4.6 agrupa todos os resultados de módulo de resiliência expresso pelo modelo composto de todas as condições de ensaio incluindo a embebição, para os três solos deste estudo.

4.6. Ensaios de Desgaste

Para a moldagem dos CPs que seriam submetidos a ensaios de desgaste, realizou-se uma pequena análise dos ensaios triaxiais dinâmicos. Adotou-se, para o Solo 2 (NG'), a moldagem de CPs de solos destorroados e não destorroados, com teores de 0% e 8% de RM-1C e RL-1C e deixados em cura ao ar durante 7 dias.

Embora no caso do Solo 3 (siltoso) tenha-se observado melhoria com a adição de 1% de RM-1C no corpo-de-prova deixado 7 dias de cura, os outros resultados dos ensaios em CPs com o mesmo tempo de cura não mostraram melhoria do comportamento do solo. Observou-se também que, mesmo os módulo de resiliência sendo baixos no caso dos CPs ensaiados imediatamente após moldagem, apresentavam melhoria no solo, por isso foram moldados CPs sem cura com teores de 1% de RM-1C para solo destorroado e 3% de RM-1C e RL-1C para os CPs dos ensaios de LWT e WTAT.

4.6.1. LWT

Os procedimentos para a realização destes ensaios foram descritos no Capítulo 3.

Para a análise dos resultados obtidos conta-se com os dados dos afundamentos e com as observações visuais realizadas durante o decorrer dos ensaios. Estas observações visuais quanto ao desempenho e as medidas de afundamento são correlacionadas a uma nota para cada conceito.

No trabalho do DUQUE NETO (2004), são propostos os conceitos de qualificação do ensaio LWT, e as pontuações para os diversos conceitos associados às medidas de afundamento no caso de base imprimada. Estas pontuações são de 1 a 10 e permitem qualificar o resultado do ensaio. As Tabelas 4.6 e 4.7 reproduzem as pontuações e os conceitos propostos.

A pontuação final é obtida a partir do somatório das 2 notas relacionadas: o afundamento e as observações visuais quanto ao comportamento. Esta pontuação qualifica o ensaio segundo a proposta do DUQUE NETO (2004).

Tabela 4.6 – Atribuições para desempenho do ensaio LWT – base imprimada, propostas por DUQUE NETO (2004)

Atribuições para desempenho no LWT - Base imprimada		
Nota	Observações visuais	Afundamento (mm)
10	Sem defeito, pouco desgaste, ausência de exudação	< 2,0
8	Poucos defeitos, arrancamento de até 40% da penetração, pequena exudação, aparecimento de lombadas sem arrancamento de placas	2,0 a 4,0
5	Arrancamento acima de 40% da penetração, arrancamento nas partidas, exudação, aparecimento de lombadas com arrancamento placas	4,0 a 6,0
0	Destruição total da penetração	> 6,0

Tabela 4.7 – Conceitos para qualificação do ensaio LWT, propostos por DUQUE NETO (2004).

Qualificação do LWT	
Pontuação	Conceito
18 a 20	Muito Bom
15 a 17	Bom
8 a 14	Ruim
0 a 7	Péssimo

4.6.1.1. Solo 2

Os resultados obtidos nos ensaios de LWT com o Solo 2 (NG'), são mostrados na Tabela 4.8 e na Figura 4.25. Como pode-se observar os resultados obtidos são considerados entre muito bom e bom.

O que se observou durante a realização destes ensaios foi que as trincas que apareceram durante a cura ao ar livre dos CPs, na realização dos ensaios foram fechadas e também se verificou que a perda de material foi pouca.

No anexo D são apresentadas fotos dos CPs ensaiados para mostrar melhor a aparência dos CPs que foram ensaiados.

Tabela 4.8 – Solo 2: qualificação do ensaio LWT.

	Notas de desempenho			
Solo 2 com Emulsão	Observações visuais	Por afundamento	Pontuação total	Conceito
0% D	7	10	17	BOM
8%RM D	9	10	19	MUITO BOM
8%RL D	10	10	20	MUITO BOM
0%ND	7	10	17	BOM
8%RM ND	7	10	17	BOM
8%RL ND	7	10	17	BOM

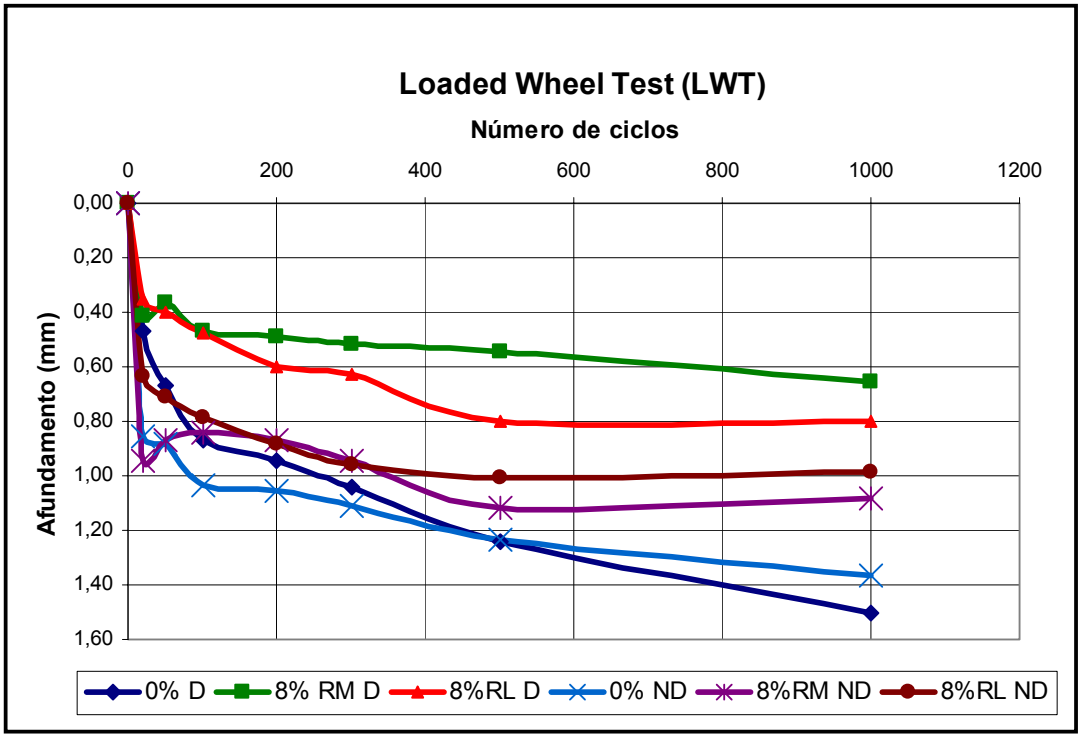


Figura 4.25 – Solo 2: resultados de LWT de CPs com 7 dias de cura

4.6.1.2. Solo 3

Ao contrário dos resultados obtidos com o Solo 2, o Solo 3 (siltoso), apresenta resultados que vão de ruim para péssimo, como mostrado na Tabela 4.9 e na Figura 4.26

O que se observou durante a realização destes ensaios foi que o material estava pouco resistente às passagens da roda, portanto acabou perdendo muito material e consequentemente o afundamento foi maior. Alguns corpos-de-prova, não chegarom aos 50 ciclos porque o afundamento era tão grande que não permitía ao equipamento seguir.

As fotos referentes a este ensaio, são mostradas no anexo D.

Tabela 4.9 – Solo 3: qualificação do ensaio LWT.

	Notas de desempenho			
Solo 3 com Emulsão	Observações visuais	Por afundamento	Pontuação total	Conceito
0% D	4	0	4	PÉSSIMO
1%RM D	4	0	4	PÉSSIMO
3%RL D	4	0	4	PÉSSIMO
0%ND	5	5	10	RUIM
3%RM ND	5	0	5	PÉSSIMO
3%RL ND	5	0	5	PÉSSIMO

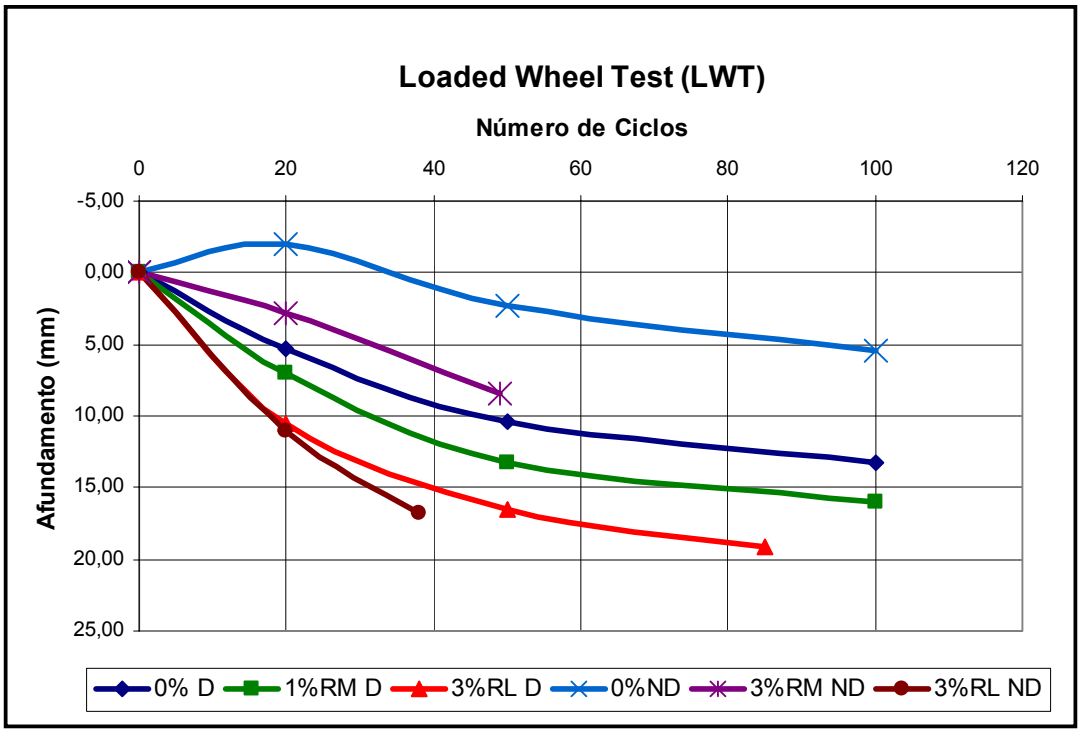


Figura 4.26 – Solo 3: resultados de LWT para CPs moldados na hora.

4.6.2. WTAT

As observações visuais quanto ao desempenho aliado à determinação das medidas e deformação permanente vertical e perda de massa por abrasão, foram correlacionadas com uma nota para cada situação, conforme critério proposto por DUQUE NETO (2004).

As Tabelas 4.10 e 4.11 mostram os parâmetros seguidos para a análise destes resultados.

Tabela 4.10 - Atribuições para desempenho do ensaio WTAT – base imprimada, propostas por DUQUE NETO (2004)

Atribuições para desempenho no WTAT – base imprimada			
Nota	Observações visuais	Perda por Abrasão (%)	Def. vertical (mm)
10	Arrancamento de até 10% e ausência de exudação	< 5	< 0,5
8	Arrancamento de 10 a 20% e pequena exudação	5 a 10	0,5 a1,0
5	Arrancamento de 20 a 50% e/ou exudação	10 a 20	1,0 a1,5
0	Arrancamento maior que 50% e/ou exudação	> 20	> 1,5

Tabela 4.11 – Conceitos para qualificação do ensaio WTAT, propostas por DUQUE NETO (2004).

Qualificação do LWT	
Pontuação	Conceito
28 a 30	Muito Bom
23 a 27	Bom
16 a 22	Ruim
0 a 15	Péssimo

4.6.2.1. Solo 2

Os dados mostrados na Tabela 4.12, são resultados da avaliação dos afundamentos, perda de massa por abrasão e observações visuais durante os ensaios com o Solo 2.

Neste caso, as notas referentes ao afundamento fazem com que o conceito caia bastante, por isso, a qualificação não é boa na maioria dos casos. O ensaio de WTAT que tem esforços de desgaste na superfície mostrou em geral conceitos piores do que os obtidos no LWT que se refere a efeitos de roda em vai-e-vem, para o solo 2.

Tabela 4.12 – Solo 2: qualificação do ensaio WTAT.

	Notas de desempenho				
Solo 2 com Emulsão	Observações visuais	Afundamento	Perda por abrasão	Pontuação total	Conceito
0% D	4	0,00	9	13,00	PESSIMO
8%RM D	4	0,00	9	13,00	PESSIMO
8%RL D	4	0,00	9	13,00	PESSIMO
0%ND	7	8,00	9	24,00	BOM
8%RM ND	5	5,00	10	20,00	RUIM
8%RL ND	7	8,00	10	25,00	BOM

4.6.2.2. Solo 3

A Tabela 4.13 contém as notas referentes às observações, afundamentos e perdas por abrasão dos ensaios realizados com o Solo 3. Os conceitos obtidos para o caso de solo-emulsão com este solo vão desde ruim até bom e pode-se observar que isto é devido a que tanto a perda por abrasão como os afundamentos na maioria dos casos é pequeno. No entanto o solo puro não destorroado também deu bom resultado. Neste caso este ensaio foi menos severo do que o LWT para o solo 3, siltoso.

Tabela 4.13 – Solo 3: qualificação do ensaio WTAT.

	Notas de desempenho				
Solo 2 com Emulsão	Observações visuais	Afundamento	Perda por abrasão	Pontuação total	Conceito
0% D	6	0,00	10	16,00	RUIM
1%RM D	6	0,00	10	16,00	RUIM
3%RL D	9	8,00	10	27,00	BOM
0%ND	10	9,00	10	29,00	MUITO BOM
3%RM ND	9	8,00	10	27,00	BOM
3%RL ND	9	8,00	10	27,00	BOM

4.7. Comparação com os resultados obtidos por MICELI (2006).

Como foi dito no inicio desta pesquisa, este trabalho faz parte de um projeto de pesquisa intitulado TAPTS (Tratamento Anti-Pó e Tratamento Superficial) que têm a participação do IME, USP-SP, UFMG e UFPR.

Por parte do IME, o projeto foi realizado por MICELI (2006), ele avalio o comportamento resiliente de três tipos de solo misturados comas mesmas emulsões asfálticas tipo RM-1C e RL-1C usadas nesta pesquisa. Nesta seção, trata-se de fazer um pequeno resumo

dos resultados obtidos nas duas pesquisas no que se refere ao módulo de resiliência em corpos-de-prova deixados 7 dias de cura ao ar.

Para a análise dos resultados obtidos nesta pesquisa e na de Micelli, simplesmente analisaram-se os resultados obtidos para o estágio 4:1 do ensaio triaxial, no qual a tensão confinante e a tensão desvio são iguais a 0,069MPa.

Apresentam-se na Tabela 4.14 as classificações dos solos estudados nas duas pesquisas, assim como a percentagem que passa na peneira #200.

Tabela 4.14 – Classificação dos solos estudados nesta pesquisa e na de Miceli (2006).

	SOLOS	% Passante na Peneira # 200	Classificação TBR	MCT
MICELI (2005)	A	30	A - 2 - 4	NA’
	B	41	A - 7 - 5	LG’
	C	41	A - 7 - 6	LG’
Apresentados nesta pesquisa	1	17	A - 1 - b	NA’
	2	61	A - 7 - 5	NG’
	3	28	A - 2 - 4	NS’

Na Tabela 4.15 mostram-se os resultados de MR (valores obtidos para uma tensão confinante e tensão desvio igual a 0,069MPa) para os 6 solos ensaiados na condição de ensaio de 7 dias de cura, destorroados e na condição de teor de emulsão considerado mais favorável em cada caso.

Tabela 4.15 - Resultados de MR (MPa) obtidos com os 6 solos ensaiados logo após moldagem e com 7 dias de cura .

	SOLOS	Tipo de emulsão	Condição de ensaio	Percentagem de emulsão	MR (MPa)
	A	-	7 dias	0%	432
MICELI (2006)	A	RL	7 dias	2%	680
	B	-	7 dias	0%	508
	B	RM	7 dias	8%	799
	C	-	7 dias	0%	315
	C	RL	7 dias	6%	877
Apresentados nesta pesquisa	1 D	-	Imediato	0%	315
	1 D	RM	Imediato	1%	407
	1 D	-	7 dias	0%	451
	1 D	RM	7 dias	2%	584
	1 D	RM	Após Abs.	2%	469
	2 ND	-	7 dias	0%	722
	2 ND	RL	7 dias	8%	1028
	2 ND	RL	Após Abs.	8%	590
	3 ND	-	Imediato	0%	94
	3 ND	RM	Imediato	3%	143
	3 D	-	7 dias	0%	776
	3 D	RM	7 dias	1%	1420
	3 D	RM	Após Abs.	1%	-

Comparando-se o Solo A com o Solo 1, ambos classificados como NA' (sendo que no caso do Solo 1 foi classificada a parcela passante da peneira N°10), nota-se que as percentagens de emulsão adicionadas são baixas se comparadas com as dos solos NG', e que a emulsão poderia ser qualquer uma RL ou RM. A melhoria do Solo 1, quando ensaiado imediatamente após compactação representa a mesma percentagem que no caso de ser ensaiado depois de 7 dias de cura (30%), mas quando o CP é deixado em cura e é submetido a ensaio após 48 horas de absorção, ele mantêm 80% do valor do módulo de resiliência o que não acontece no CP ensaiado imediatamente porque com ele não foi possível realizar o ensaio após absorção por excesso de deformação permanente.

Outra observação a respeito dos Solos A e 1, é que mesmo os dois sendo tipo NA', o Solo A com a mesma percentagem de emulsão tem uma melhoria de 60% em relação ao solo puro e no caso do Solo 1, esta melhoria representa um 30%, o que poderia ser devido a que o Solo A, tem 30% de material passante na peneira #200 e o Solo 1 tem só 17% e é mais granular no total.

No caso dos Solos B e C (LG') e o Solo 2 (NG') não se apresentam diferenças significativas, todos mostraram um bom comportamento quando estabilizados com

emulsões, quando deixados 7 dias de cura ao ar. Os teores utilizados para estes tipos de solo, são maiores (entre 6 e 8%) que para os solos arenosos (2%) e na maioria dos casos a emulsão RL se mostrou melhor, sendo que na prática este tipo de emulsão oferece melhor trabalhabilidade. A melhoria destes solos misturados é maior do que 40%, no caso do Solo C, esta melhoria chega até 178%. Outra característica que mostrou o Solo 2 foi que o valor do módulo alcançado se mantêm depois das 48 horas de absorção em no mínimo um 60%.

4.8. Exemplo de Dimensionamento Mecanístico

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos no dimensionamento de pavimentos de baixo volume de tráfego, considerando os 3 solos estudados nesta dissertação, como base ou revestimento.

Para a análise das estruturas dimensionadas pelo método mecanístico, utilizou-se o Programa FEPAVE2, com o qual obtiveram-se as deflexões e as tensões no subleito para cada uma das estruturas com cada um dos solos estudados.

As estruturas hipotéticas analisadas encontram-se descritas na Figura 4.27.

Figura 4.27 - Tipos de estrutura analisados com o Programa FEPAVE.

Para a Estrutura I, considerou-se uma estrutura com tratamento superficial (2 cm de espessura e MR = 500MPa), uma camada de 15 cm de solo puro e a camada de subleito compactado (MR = 50MPa). A Estrutura II está constituída por uma capa de tratamento superficial (MR = 500MPa), uma camada de 15 cm de base de solo-emulsão e o subleito compactado. Na Estrutura III, analizou-se uma estrutura formada por um revestimento primário de 15cm de solo-emulsão e o subleito compactado.

A seguir, são detalhados os dados de entrada e são mostradas as tabelas com os dados de saída do programa FEPAVE2.

As situações analisadas, para as Estruturas II e III são:

a) Base de solo-emulsão, (SL= solo puro)

b) Base de solo-emulsão, (SL= 50MPa)

c) Base de solo-emulsão, (condição de embebição, SL= solo puro)

d) Base de solo-emulsão, (condição de embebição, SL= 50MPa)

e) Revestimento Primário, (SL= solo puro)

f) Revestimento Primário, (SL= 50MPa)

g) Revestimento Primário, (condição de embebição, SL= solo puro)

h) Revestimento Primário, (condição de embebição, SL= 50MPa)

4.8.1. Solo 1

Para o dimensionamento com este solo foram adotados os seguintes valores:

- Nas camadas onde utilizou-se solo puro foram considerados os valores obtidos para o solo ensaiado imediatamente após moldagem. ($K_1 = 222{,}9$ e $K_2 = -0{,}0522$, em função de σ_3)
- Para as camadas de base de solo-emulsão e revestimento primário com solo-emulsão, os dados utilizados são os correspondentes ao CP de solo destorroado com 2% de emulsão do tipo RM-1C com 7 dias de cura ao ar. ($MR = 584MPa$, $K_1 = 505{,}7$, $K_2 = 0{,}0277$, em função de σ_3)
- Para a condição de embebição os dados de entrada foram os correspondentes ao mesmo CP utilizado nas camadas de base e revestimento de solo-emulsão após 48 horas de absorção. ($MR = 469MPa$, $K_1 = 322{,}9$, $K_2 = -0{,}0749$, em função de σ_3).

Tabela 4.16 – Resultados obtidos com o Programa FEPAVE para o Solo 1

SOLO 1	Estrutura I	Estrurura II				Estrutura III			
		a	b	c	d	e	f	g	H
Deflexão (10^{-2}mm)	100	26	90	27	93	25	91	27	96
Tensão vertical no subleito (MPa)	0,12	0,17	0,11	0,18	0,11	0,19	0,12	0,20	0,13

Deve-se considerar, no caso da Estrutura III onde o solo estabilizado com emulsão está exposto ao tráfego que nos ensaios após absorção há uma queda de 20% no módulo e que não foram realizados ensaios de LWT e WTAT com este material.

Os resultados das estruturas analisadas estão dentro das condições exigidas pela Norma 269/94, da qual se obtiveram como valores admissíveis:
Deflexão adm.: 161,5 (10^{-2}mm)
Tensão adm. no subleito: 0,3417 (MPa)

4.8.2. Solo 2

Os valores adotados para o dimensionamento com o Solo 2 foram:

- Nas camadas onde utilizou-se solo puro foram considerados os valores obtidos para o CP de solo não destorroado ensaiado imediatamente após moldagem. ($K_1 = 40{,}2$ e $K_2 = -0{,}5665$, em função de σ_d).
- Para as camadas de base de solo-emulsão e revestimento primário com solo-emulsão, os dados utilizados são os correspondentes ao CP de solo não destorroado com 8% de emulsão do tipo RL-1C, com 7 dias de cura ao ar. ($MR = 1028MPa$, $K_1 = 592{,}3$, $K_2 = -0{,}1046$, em função de σ_d).
- Para a condição de embebição os dados de entrada foram os correspondentes ao mesmo CP utilizado nas camadas de base e revestimento de solo-emulsão após 48 horas de absorção. ($MR = 590MPa$, $K_1 = 435{,}8$, $K_2 = -0{,}0294$, em função de σ_d)

Tabela 4.17 – Resultados obtidos com o Programa FEPAVE para o Solo 2

SOLO 2	Estrutura I	Estrurura II				Estrutura III			
		a	b	c	d	e	f	g	h
Deflexão (10^{-2}mm)	101	19	80	22	89	18	79	21	91
Tensão vertical no subleito (MPa)	0,12	0,15	0,10	0,16	0,11	0,16	0,10	0,18	0,12

Deve-se considerar no caso da Estrutura III onde o solo estabilizado com emulsão está exposto ao tráfego que nos ensaios após absorção de água, no solo não destorroado há uma queda de 40% enquanto no solo destorroado esta queda é só de 5%. Para a situação de solo destorroado mostra-se que no caso de solo argiloso a presença da emulsão ajuda na impermeabilização, porém levando em conta que o teor de emulsão foi muito mais alto do que no Solo 1. Foram realizados ensaios de LWT e WTAT com este material e no ensaio de deformação permanente os resultados foram bons, mas nos de arrancamento (WTAT) já não foram.

Os parâmetros admissíveis calculados segundo a Norma DNER 269/94, são:
Deflexão adm.: 161,5 (10^{-2}mm)
Tensão adm. No subleito: 0,25 (MPa)

4.8.3. Solo 3

No caso do Solo 3, adotaram-se os seguintes valores:

- Nas camadas onde utilizou-se solo puro foram considerados os valores obtidos para o CP de solo não destorroado ensaiado imediatamente após moldagem. ($K_1 = 141{,}3$ e $K_2 = -0{,}1912$, em função de σ_3).
- Para as camadas de base de solo-emulsão e revestimento primário com solo-emulsão, os dados utilizados são os correspondentes ao CP de solo destorroado com 1% de emulsão do tipo RM-1C com 7 dias de cura ao ar. ($MR = 1420MPa$, $K_1 = 556$, $K_2 = -0{,}0673$, em função de σ_3)
- Neste caso não se realizou a estrutura com a condição de embebição, devido a que não foi possível realizar o ensaio de módulo após 48 horas de absorção com este CP.

Tabela 4.18 – Resultados obtidos com o Programa FEPAVE para o Solo 3

SOLO 3	Estrutura I	Estrurura II		Estrutura III	
		a	b	e	f
Deflexão (10^{-2}mm)	127	21	82	19	72
Tensão vertical no subleito (MPa)	0,14	0,17	0,10	0,16	0,09

Deve-se considerar no caso da Estrutura III onde o solo estabilizado com emulsão está exposto ao tráfego que nos ensaios após absorção de água, no solo não destorroado há uma queda acentuada no módulo com a entrada de água, e que nos ensaios de LWT e WTAT com este material os resultados foram contraditórios, apresentando comportamento não adequado quanto á deformação permanente.

Os parâmetros admissíveis calculados segundo a Norma DNER 269/94, são:
Deflexão adm.: 161,5 (10^{-2}mm)
Tensão adm. no subleito: 0,11 (MPa)

Neste caso a maioria das estruturas resulta em valores maiores do que o admisível no referente à tensão no subleito, então para este cãs, aumentou-se a espessura das camadas de solo-emulsão para 20 cm e obtiveram-se os seguintes resultados

Tabela 4.19 – Resultados obtidos na segunda tentativa, com o Programa FEPAVE para o Solo 3

SOLO 3	Estrutura I	Estrurura II		Estrutura III	
		a	b	e	f
Deflexão (10^{-2}mm)	127	20	70	17	60
Tensão vertical no subleito (MPa)	0,14	0,12	0,07	0,11	0,06

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 Considerações Finais

Neste trabalho foram realizados 208 corpos-de-prova de resistência à compressão simples, 78 triaxiais dinâmicos (que também foram usados para a realização da absorção), 24 de LWT e 24 de WTAT, somando um total aproximado de 900Kg.

Ao final deste trabalho, notou-se como visto na bibliografia que existem vários parâmetros que condicionam o bom funcionamento da emulsão asfáltica para a estabilização de solos.

A adição de emulsão aos solos estudados melhora, mesmo que em pequena proporção, as características de coesão e de impermeabilidade.

O tempo de cura mostrou ser um fator importante, tomando em conta que para o Solo 2 (NG') é fundamental a cura dos CPs e no caso dos outros solos 1 e 3, (NA' e NS', respectivamente) os ensaios imediatos mostraram bons resultados de módulo inicialmente, mas quando foram submetidos à absorção e logo de 48 horas foram ensaiados de novo, o valor do módulo diminuiu num 50 %.

O ensaio de RCS, mostrou-se desnecessário, tomando em conta que os resultados que proporciona não servem para a análise mecanística.

Respeito aos ensaios Triaxiais Dinâmicos nota-se que é importante a analise completa dos resultados de módulo de resiliência tomando em conta que a análise de um solo estágio fica muito tendenciosa.

Os ensaios de absorção mostram, no caso do Solo 2 (NG') que a emulsão atua como impermeabilizante dos solos o que não acontece com o Solo 3 (NS') devido a que os teores utilizados neste ultimo caso são menores.

Os ensaios de desgaste são importantes quando o que se quer é o uso de solo-emulsão como revestimento do pavimento. Neste estudo obtiveram-se resultados satisfatórios para o saso do Solo 2.

5.2 Conclusões

Verifica-se a influência das diferentes variáveis consideradas na mistura do solo-emulsão:

- Houve maior facilidade de mistura com os solos arenosos-siltoso (Solo 3) e pedregulhoso (Solo 1) do que com o argiloso (Solo 2), e a emulsão RL-1C proporcionou melhor trabalhabilidade do que a RM-1C.
- O teor de água de compactação utilizado próximo ao teor ótimo, mostrou-se adequado para a homogeneização e moldagem dos corpos-de-prova, sendo as massas específicas obtidas inferiores às dos solos puros.
- A utilização de solos destorroados e não destorroados teve também certa influência nos resultados de módulo e de absorção, sendo que no caso do Solo 2 (argiloso) o não destorroamento mostrou o melhor resultado, o que facilita na construção pois, além dos bons resultados de resistência e módulo de resiliência, o fato de não ter que destorroar perfeitamente o solo torna a construção mais econômica.
- Quanto ao tempo de cura, nota-se que no caso dos solos 1 (areia pedregulhosa) e 3 (silte arenoso), poderiam ser utilizadas misturas sem secagem de vários dias, supondo que o volume de tráfego seja baixo. Porém, para o Solo 2 (argila)é indispensável um tempo de cura para que haja uma melhoria ao adicionar emulsão.
- O ensaio de resistência à compressão simples e o ensaio triaxial, no estágio analisado, não mostraram a mesma tendência de variação da RCS e do MR em relação ao teor ótimo de emulsão asfáltica. Apesar da maior seceptibilidade do ensaio de RCS ele não serve à análise mecanística.
- Não se podem tirar conclusões confiáveis do ensaio de absorção, pois os corpos-de-prova provenientes dos ensaios triaxiais dinâmicos deixados em contato com a água na base do cilindro por 48 horas apresentaram falta de homogeneidade da umidade.
- Com relação aos ensaios de desgaste, houve divergência entre os resultados dos dois tipos de solicitação, o que pode ser explicado pela solicitação diferente imposta em cada aplicação de carga; o LWT com movimentos de vai-e-vem solicita mais à deformação permanente enquanto o WTAT com movimentos “circulares” provoca mais o arrancamento propriamente dito, portanto mais associado ao desgaste superficial por contato direto com os pneus. Nestes ensaios de desgaste: o Solo 2 apresentou bons resultados tanto no ensaio LWT quanto no de WTAT. Porém o Solo 3 com emulsão apresentou deformação permanente bem maior que o solo puro no ensaio LWT e no ensaio WTAT se mostrou satisfatório.
- Comparando-se os resultados deste estudo com os obtidos por Miceli (2006) com as mesmas emulsões aplicadas em solos também do estado do Rio, mas diferentes em suas origens, pode-se dizer que a estabilização de solos com emulsão tem bom

potencial de aplicação, e como em todo processo de estabilização com uso de produtos industriais os resultados são variáveis com o tipo de solo, devendo ser analisadas várias facetas do processo antes de decidir sobre o teor de projeto e se este é economicamente viável para locais de baixo volume de tráfego.

- Não é de igual relevância a atuação da emulsão como agente impermeabilizante do solo quando se testam valores diferentes de emulsão residual nos vários solos ensaiados. Talvez se a melhoria que se busca com a estabilização com asfalto seja mais associada a este aspecto, os ensaios com embebição em vários teores é que servissem para definir o teor de projeto.
- Quanto ao dimensionamento realizado, as estruturas nas quais são utilizadas camadas de solo-emulsão mostraram uma redução da deflexão maior ao 50% com tensões no subleito aceptáveis.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

- Maior número de ensaios e trabalhos no gênero para se chegar a parâmetros satisfatórios e necessários para uma análise mecanística.
- A adoção de 7 dias de cura ao ar mostrou resultados satisfatórios para os 3 tipos de solo, mas tempos menores devem ser pesquisados pois há perda excessiva de umidade nesta condição.
- Outra variável a estudar é o fato de deixar a mistura solo-emulsão em cura antes da compactação dos CPs..
- Respeito ao tipo de emulsão asfáltica, sugere-se tentar utilizar emulsões modificadas, não comerciais, que sejam fabricadas exclusivamente para o uso em pavimentação.
- Outra alternativa quanto ao uso de emulsões poderia ser a combinação da estabilização granulométrica com a estabilização química.
- Sugeriria incluir o estudo da deformação permanente no ensaio triaxial de solo-emulsão asfáltica. Também adotar os ensaios de permeabilidade e infiltrabilidade dos estudos de Nogami e colaboradores.
- Sugere-se fazer um controle mais detalhado nos ensaios de absorção. Neste sentido, sugere-se que antes de serem submetidos à absorção os CPs sejam envolvidos em papel filme na parte superior, para evitar a evaporação da água de moldagem.
- Outra experiência interessante como sugestão é o fato de tentar realizar ensaios de desgaste após a absorção de água.
- Por ultimo, sugere-se fazer uma análise de custos para a utilização de emulsões na pavimentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDA, Manual básico de emulsões asfálticas. Soluções para pavimentar sua cidade. Rio de Janeiro, 2001.

ALCÂNTARA, M.A., LIMA, D., BUENO, B., DA COSTA, L., *Considerações sobre o uso de aditivos químicos em regiões tropicais.* In: 29° *Reunião anual de pavimentação*, pp. 99-110, Cuiabá, Mato Grosso. Outubro, 1995.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS, ASTM. *D 4223-99 Standard practice for preparation of test specimens of asphalt-* stabilized soils. Estados Unidos, 2006.

BENEVIDES, S.A.S., *Análise comparativa dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos: empírico do DNER e da Resiliência da COPPE/UFRJ em rodovias do estado do Ceará.* Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

BALBO, J.T., "Alguns conceitos diferenciadores dos materiais estabilizados com cimento". In: 7° *Reunião de pavimentação urbana*, pp.274 – 294, São José dos Campos - São Paulo. Junho, 1996.

CABRAL, G. L. L., *Metodologia de produção e emprego de agregados de argila calcinada para pavimentação.* Dissertação de M.Sc. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

CARVALHO, C.A., DOURADO, J.F., SANTOS, N.R., *"*Uma análise de desgaste e de resistência à compressão simples – Mistura solo-betume*".* In: 26° *Reunião anual de pavimentação*, pp. 150-164, Aracaju, Sergipe. Outubro, 1992.

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

CASTRO, C.A., *Estudo da técnica anti-pó com emulsão de xisto em pavimentos para baixo volume de tráfego*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

CHAVES, F.J., *Estudo de dosagem de areia-asfalto à frio*. Exame de qualificação ao Doutorado, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

COSTA, C.A., *Emulsões asfálticas e suas aplicações na pavimentação rodoviária.* In: Curso de especialização em pavimentação, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2004.

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

DNER-ME 041/94 “Solos – preparação de amostras para caracterização”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 051/94 “Solos – análise granulométrica”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 082/94 “Solos – determinação do limite de plasticidade”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 093/94 “Solos – determinação da densidade real”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 122/94 “Solos – determinação do limite de liquidez”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 129/94 “Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

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

DNER-ME 162/94 “Solos – compactação utilizando amostras trabalhadas”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 259/96 “Clasificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Clasificação. Rio de Janeiro, 1996.

DNER-ME 202/94 “Solos – resistência à compressão simples de corpos-de-prova compactados”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-PRO 269/94 “Projeto de restauração de pavimentos flexíveis - TECNAPAV”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Procedimento. Rio de Janeiro, 1994.

DUQUE NETO, F.S., *Proposição de metodologia para escola de solo e dosagem de anti-pó com emulsão de xisto.* Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

FERREIRA, J.G.H.M., *Elaboração e análise da base de dados de ensaios triaxiais dinâmicos da* COPPE/UFRJ. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2002.

GUIDA, H.N., *Estabilização de um solo fino lateríticos pelo ácido fosfórico.* Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1971.

GOMES DE MATTOS, A.B., “Estabilização de solo com betume”. In: : 25° *Reunião anual de pavimentação*, São Paulo. Outubro, 1991.

GONÇALVES, R.M., BRASILEIRO, F.E., CARVALHO, J.B., “Utilização do calcário em concreto asfáltico e em estabilização de bases rodoviárias”. In: 29° *Reunião anual de pavimentação*, pp. 03-19, Cuiabá, Mato Grosso. Outubro, 1995.

Instituto do Asfalto, Manual de Asfalto. Instituto de Asfalto. Edição 1989. Versão em Português 2001.

JACINTHO, E.C., *Estudo do comportamento de misturas solo-emulsão para uso em barragens.* Dissertação de M.Sc., Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2005.

JACINTHO, E.C., CARVALHO, J.C., FARIAS, M.M., GUIMARÂES, R.C., "Influência das propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo no comportamento de misturas solo-emulsão". In: : 36° *Reunião anual de pavimentação*, Curitiba, PR. Agosto, 2005.

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

LUCENA, F., FERREIRA, H.B., ARAÚJO, R.N., "Uso de emulsão catiônica na estabilização de solos lateríticos". In: *17° Reunião anual de pavimentação*, pp. IV67-IV91, Brasília. Julho, 1982.

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

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

MEDINA, J., "Evolução da mecânica dos pavimentos no Brasil". In: *25ª Reunião Anual de Pavimentação*. São Paulo. Outubro, 1991.

MEDINA, J., GUIDA, H.N., *Stabilization of lateritic soils with phosphoric acid.* Geotechnical and Geological Engineering. Chapman & Hall, 1975.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G., *Apostila de estabilização de solos*. Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G., *Mecânica dos pavimentos- 2° edição.* Editora COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

MICELI, J.G., *Comportamento de solos do estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica.* Dissertação de M.Sc. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

MOMM, L., "Uso de emulsão catiônica na estabilização de solos". In: 18° *Runião anual de pavimentação*, pp. 553-577, Porto Alegre, RS. Setembro, 1983.

MOTTA, L.M., "Considerações à respeito de pavimentos e tráfego nas vias urbanas". In: *6° Runião de pavimentação urbana*, pp. 25-52, Santos – São Paulo. Abril, 1995.

MOTTA, L.M.G., “Notas de Aula”. Universidade Federal de Pernambuco -UFPE. Recife/PE, 2002.

NASCIMENTO, R.R., *Utilização de agregados de argila calcinada em pavimentação: uma alternativa para o estado do Acre.* Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

PESSOA, F.H.C., *Análises dos solos de Urucu para fins de uso Rodoviário*. Dissertação de M.Sc., Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

SANTANA, H., “*Tratamento contra pó em solos de características lateríticas”*. In: 23° *Reunião Anual de Pavimentação*. ABPV. Florianópolis, *SC,* 1971.

SANTANA, H., “ Estabilização betuminosa de revestimentos primários”. In: 1°*Reunião de Técnicos em Manutenção de Estradas de Rodagem* - 1° REMETER. Fortaleza, CE, 1978.

SANTOS, M., LIMA, D., BUENO, B., “Estabilização dos solos com cal e betume”. In: *6° Reunião de pavimentação urbana*, pp.74 – 97, Santos – São Paulo, Abril, 1995.

TELFORD, T., *Asphalts in road construction.* 1°Edição, 2000.

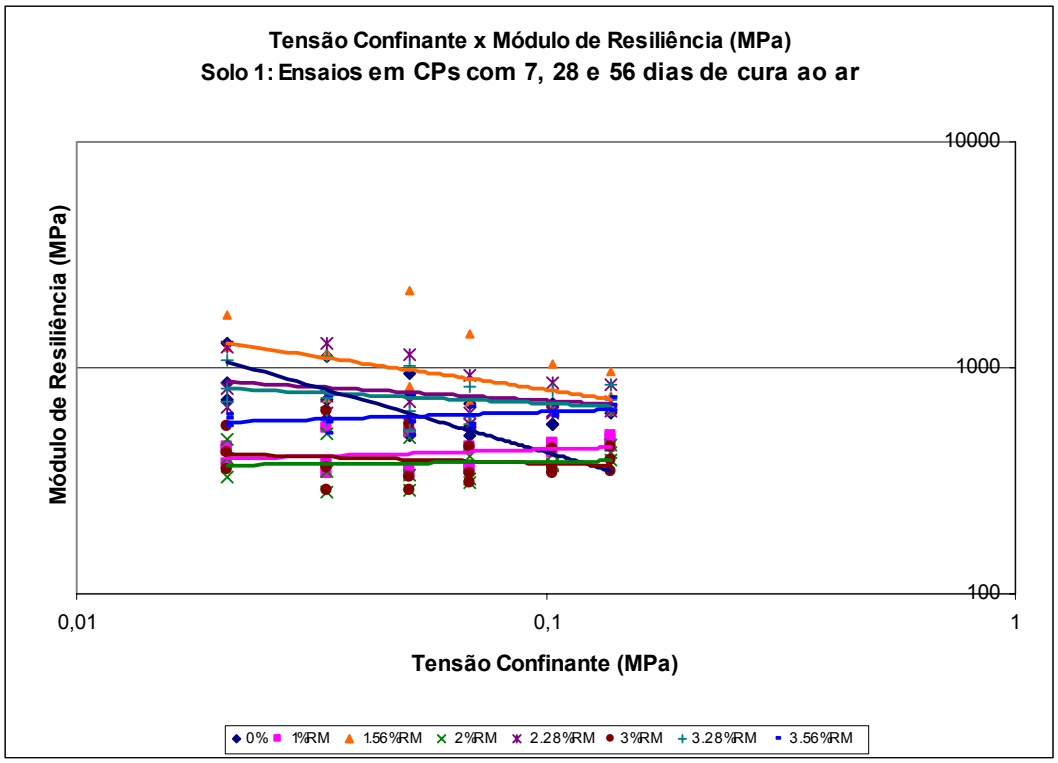
THULER, R., *Estudo de solos do estado do Rio de Janeiro para aplicação em rodovias de baixo volume de tráfego.* Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

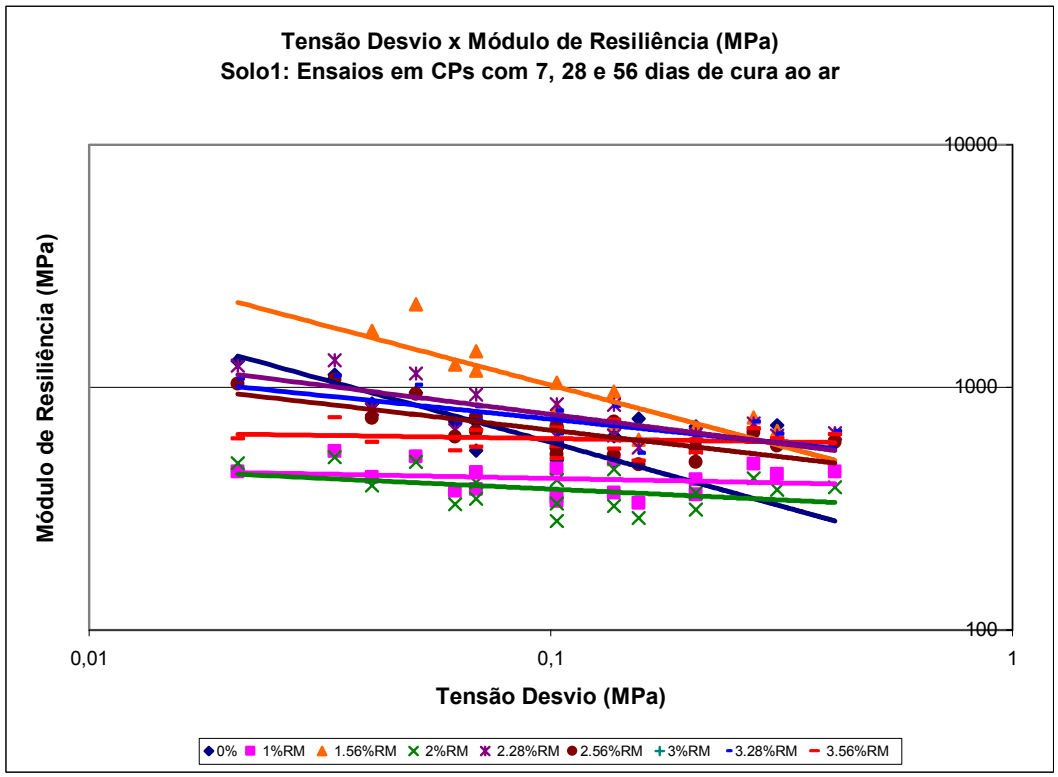
YODER, E.J., WITCZAK, M.W., *Principles of pavement design*. Second Edition. New York – London – Sydney – Toronto, 1975.

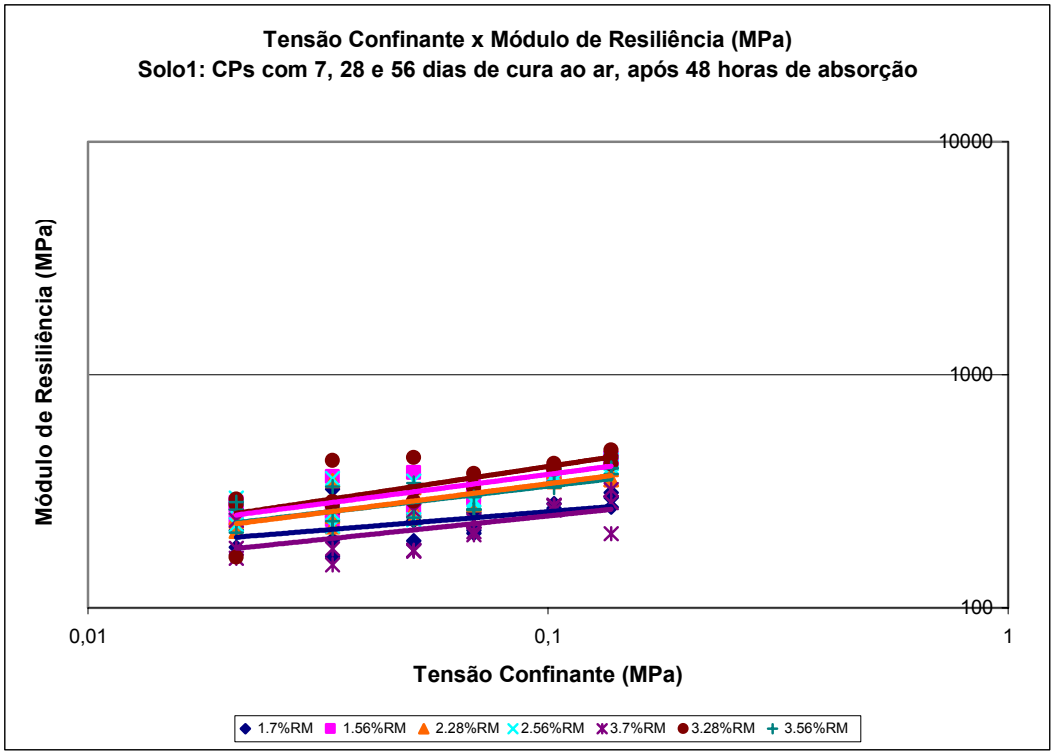
VOGT,J.C., *Estabilização Betuminosa*. In: 7°*Simpósio sobre pesquisas rodoviárias*, Rio de Janeiro. Julho, 1971.

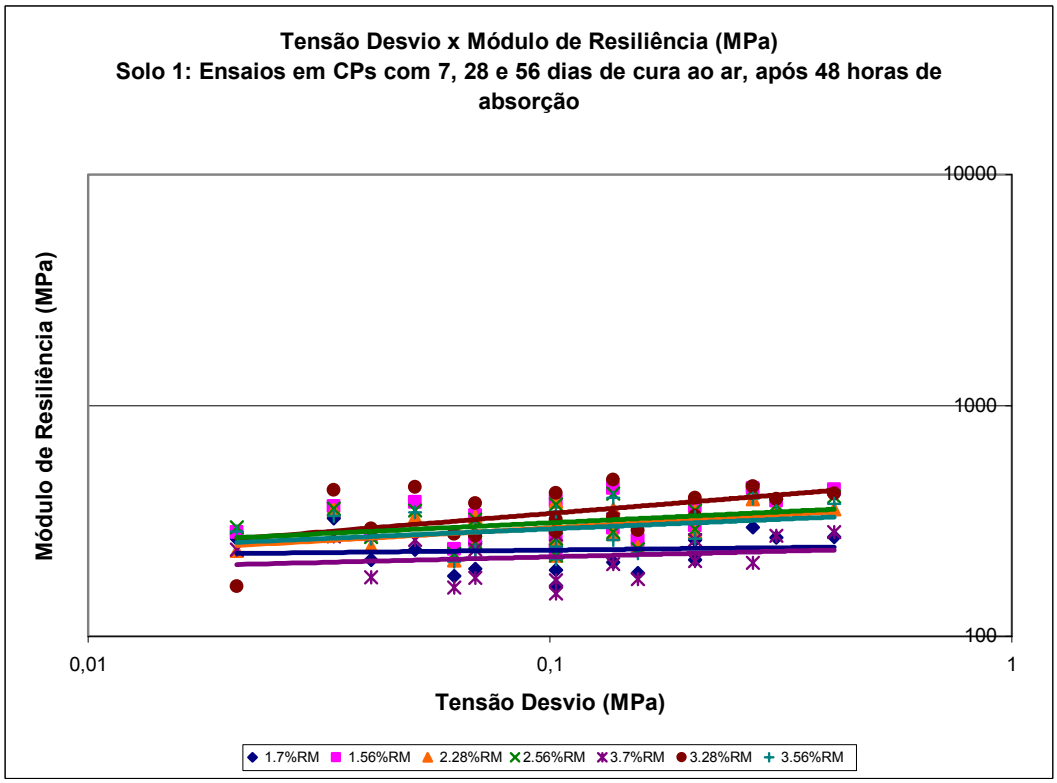
ANEXO A

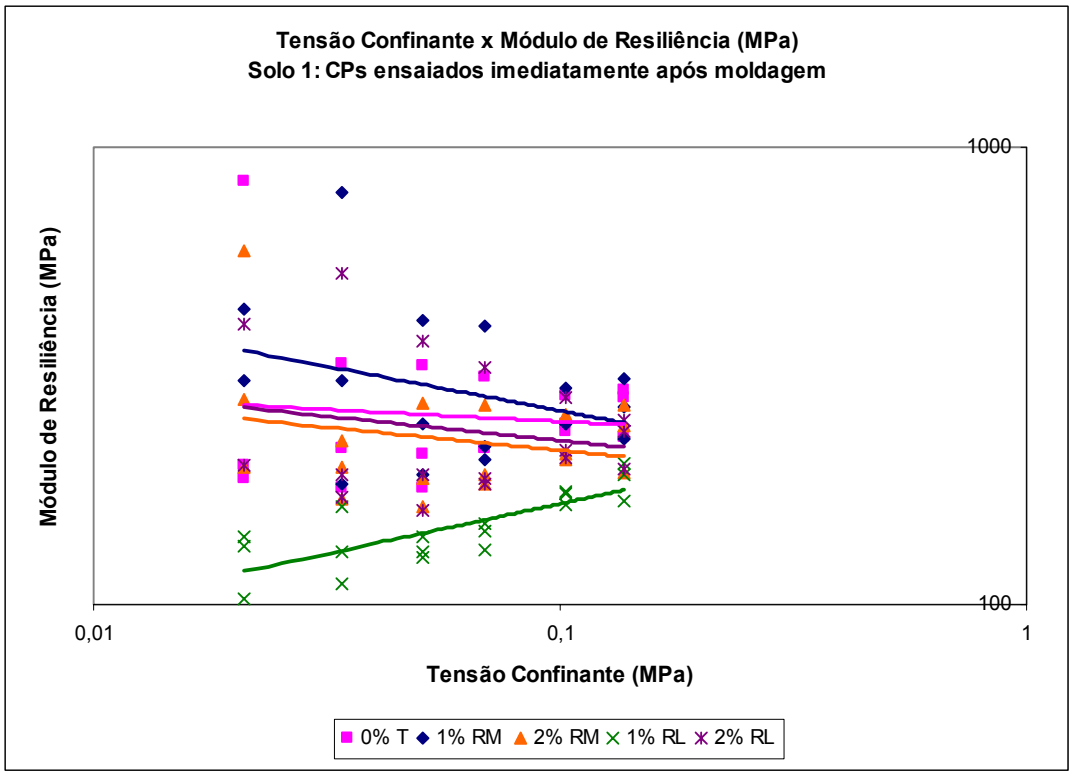
RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA DOS SOLOS – SOLO 1.

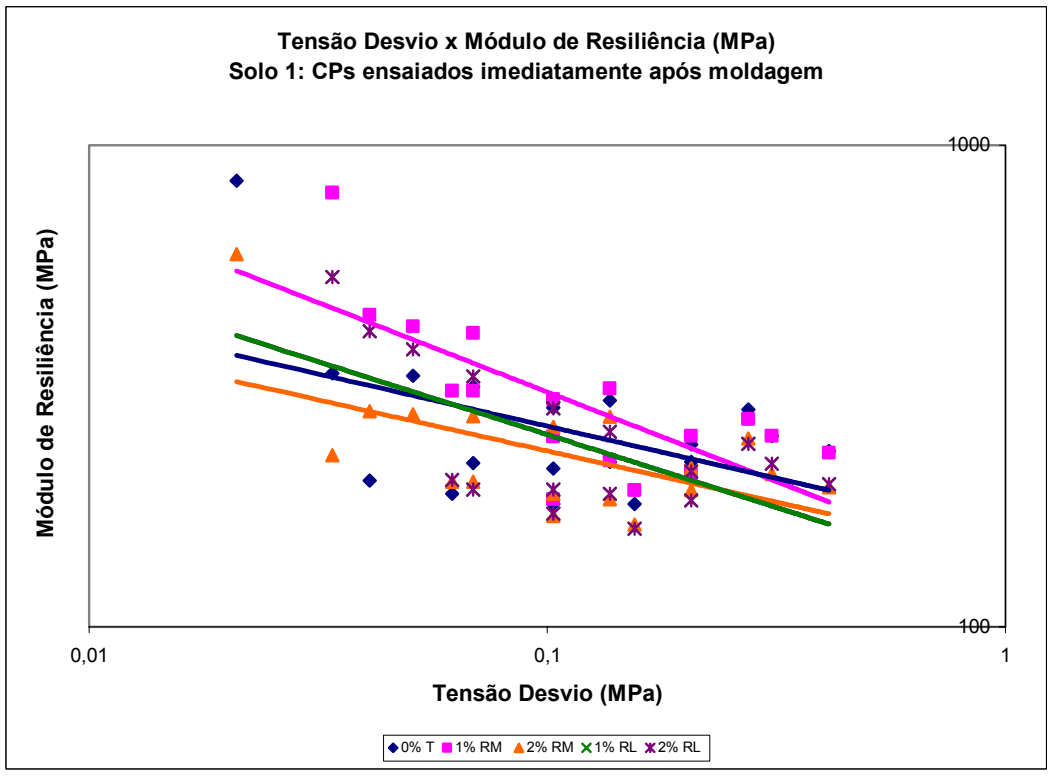

Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 1: Ensaios em CPs com 7, 28 e 56 dias de cura ao ar
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
0% 1%RM 1.56%RM 2%RM 2.28%RM 3%RM 3.28%RM 3.56%RM

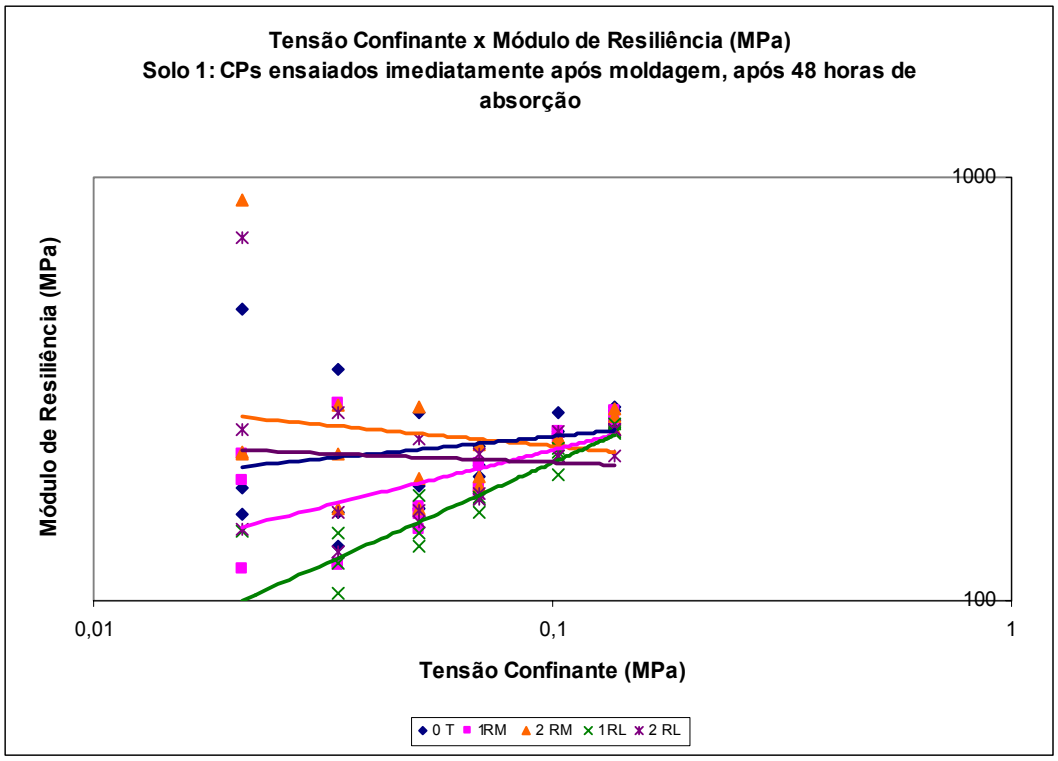

Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo1: Ensaios em CPs com 7, 28 e 56 dias de cura ao ar
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
0% 1%RM 1.56%RM 2%RM 2.28%RM 2.56%RM 3%RM 3.28%RM 3.56%RM

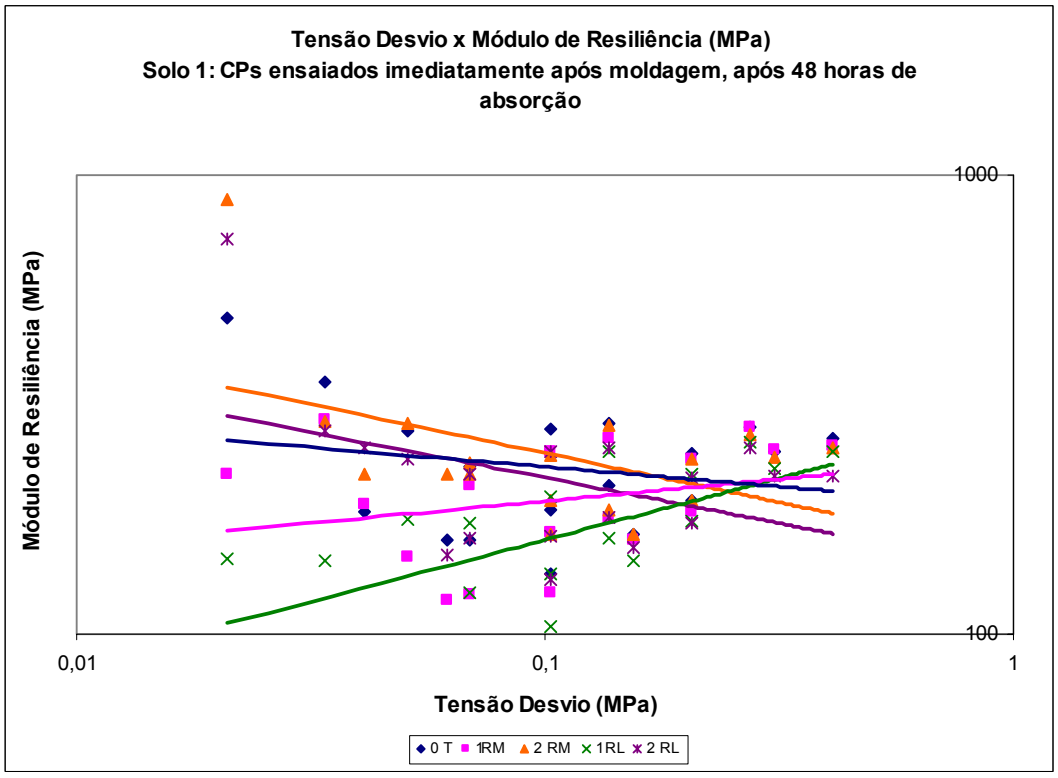

Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo1: CPs com 7, 28 e 56 dias de cura ao ar, após 48 horas de absorção
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
1.7%RM
1.56%RM
2.28%RM
2.56%RM
3.7%RM
3.28%RM
3.56%RM

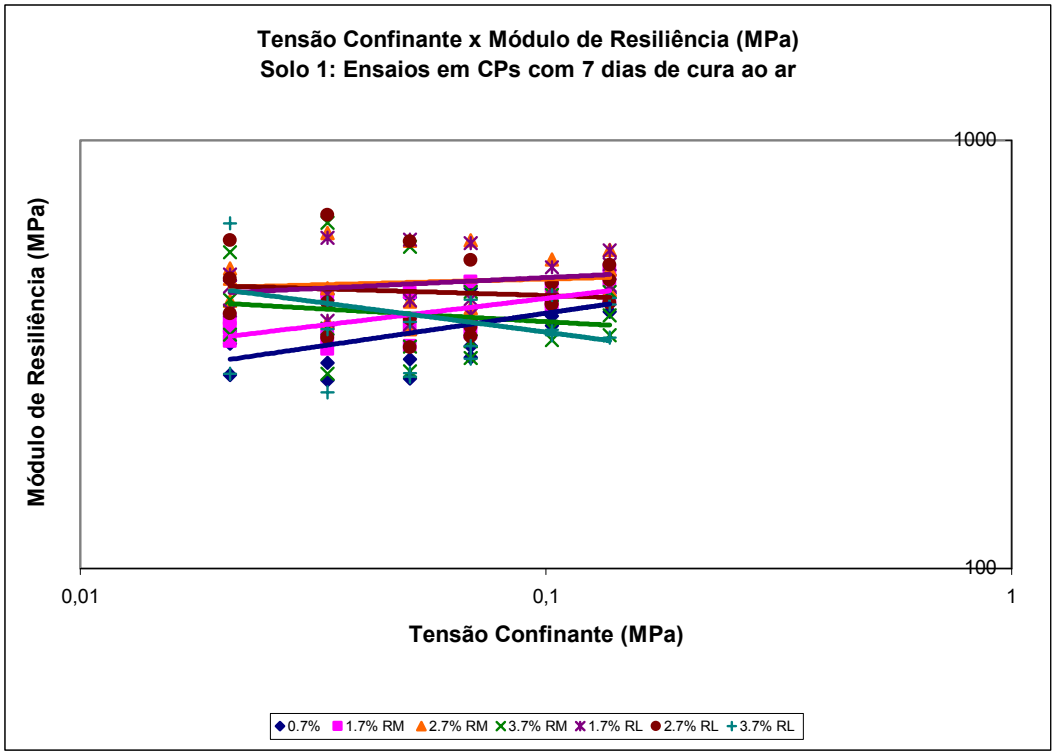

Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 1: Ensaios em CPs com 7, 28 e 56 dias de cura ao ar, após 48 horas de absorção
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
1.7%RM
1.56%RM
2.28%RM
2.56%RM
3.7%RM
3.28%RM
3.56%RM

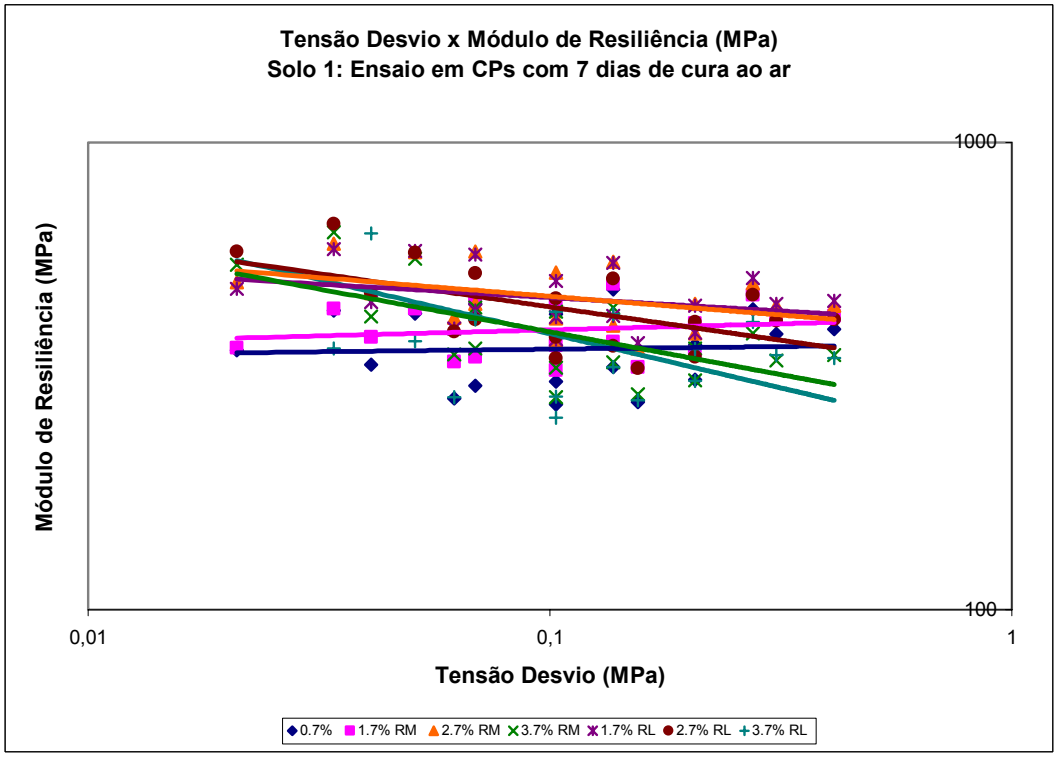

Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 1: CPs ensaiados imediatamente após moldagem
Módulo de Resiliência (MPa)
1000
100
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
0% T
1% RM
2% RM
1% RL
2% RL

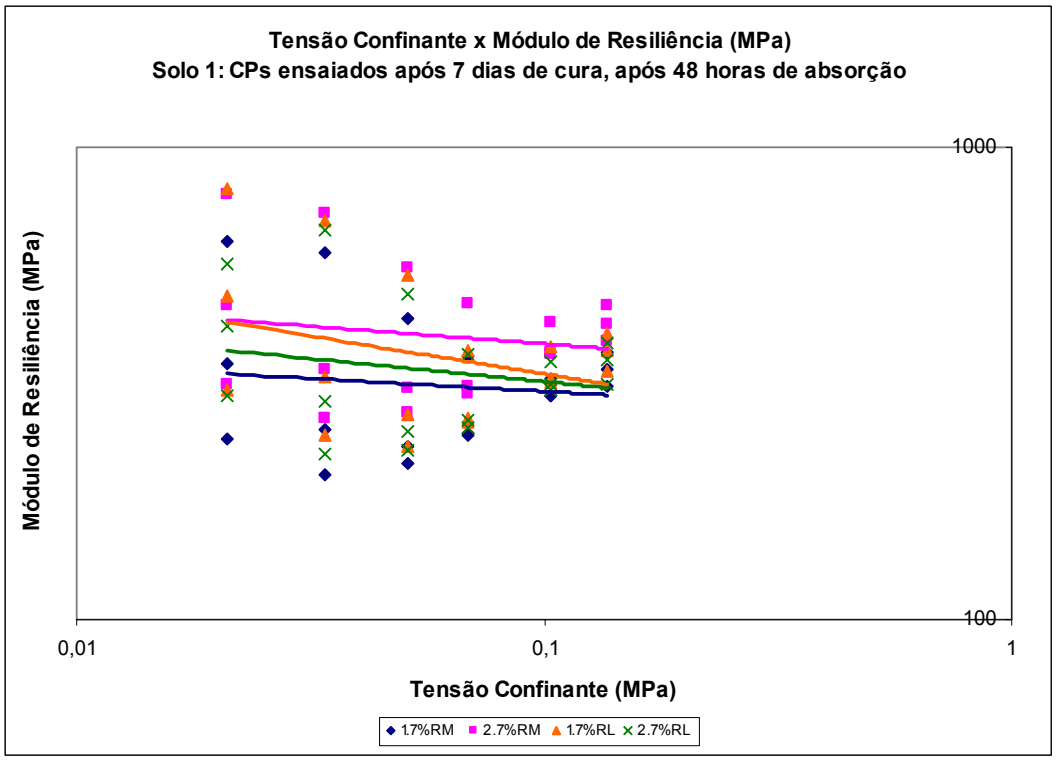

Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 1: CPs ensaiados imediatamente após moldagem
Módulo de Resiliência (MPa)
1000
100
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
0% T
1% RM
2% RM
1% RL
2% RL

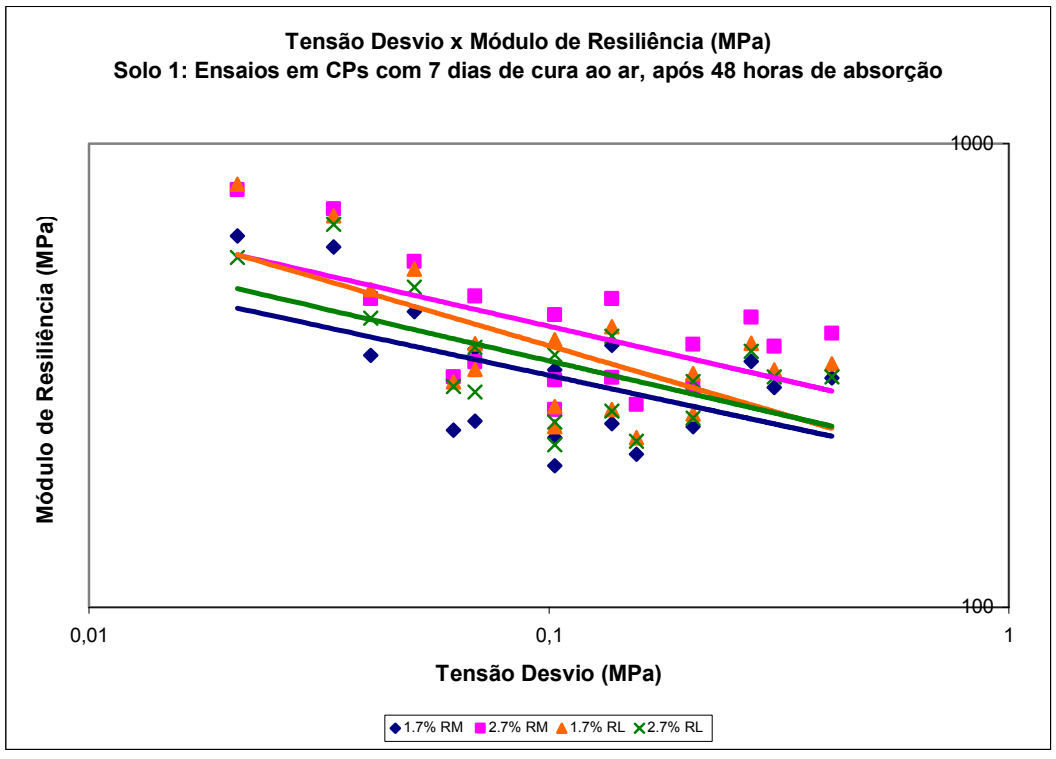

Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 1: CPs ensaiados imediatamente após moldagem, após 48 horas de absorção
Módulo de Resiliência (MPa)
1000
100
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
0 T
1RM
2 RM
1RL
2 RL


Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 1: CPs ensaiados imediatamente após moldagem, após 48 horas de absorção
Módulo de Resiliência (MPa)
1000
100
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
0 T
1RM
2 RM
1RL
2 RL


Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 1: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar
Módulo de Resiliência (MPa)
1000
100
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
0.7%
1.7% RM
2.7% RM
3.7% RM
1.7% RL
2.7% RL
3.7% RL

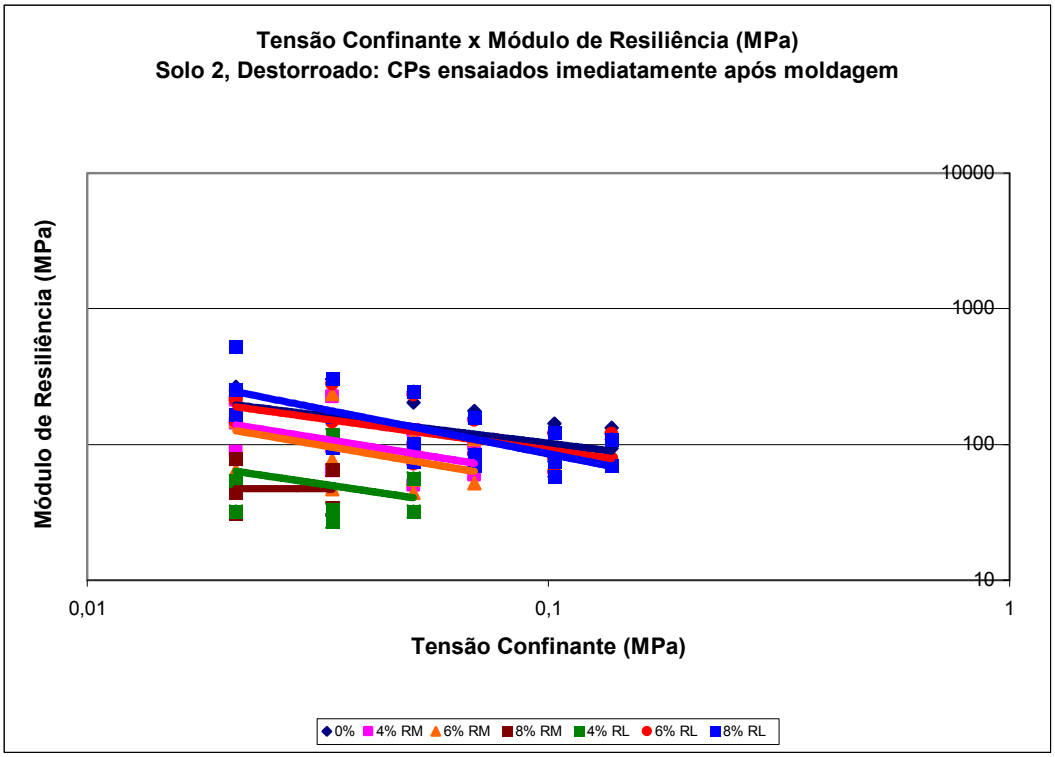

Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 1: Ensaio em CPs com 7 dias de cura ao ar
Módulo de Resiliência (MPa)
1000
100
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
0.7%
1.7% RM
2.7% RM
3.7% RM
1.7% RL
2.7% RL
3.7% RL

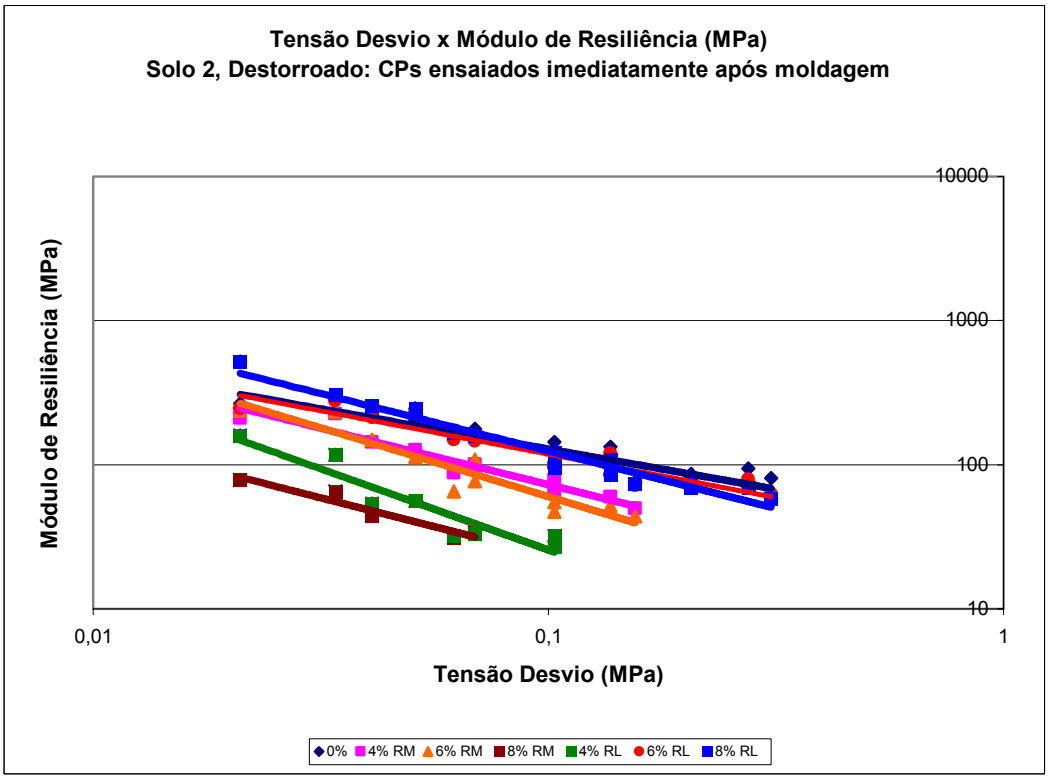

Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 1: CPs ensaiados após 7 dias de cura, após 48 horas de absorção
Módulo de Resiliência (MPa)
1000
100
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
1.7%RM
2.7%RM
1.7%RL
2.7%RL

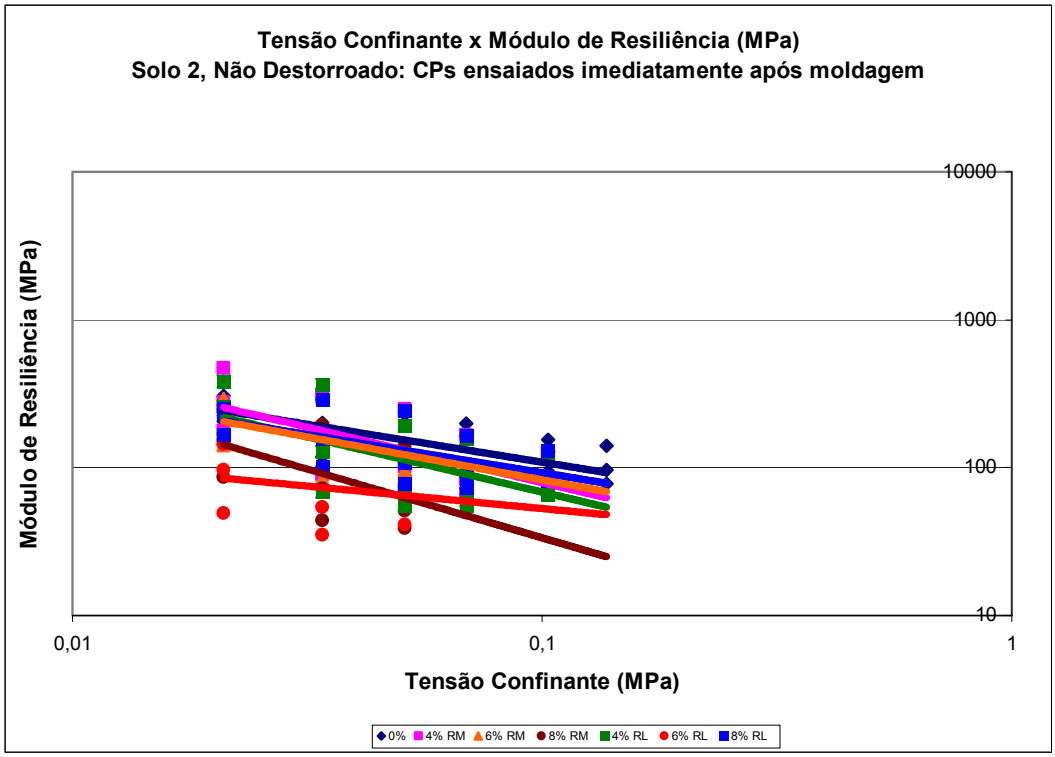

Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 1: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar, após 48 horas de absorção
Módulo de Resiliência (MPa)
1000
100
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
1.7% RM
2.7% RM
1.7% RL
2.7% RL

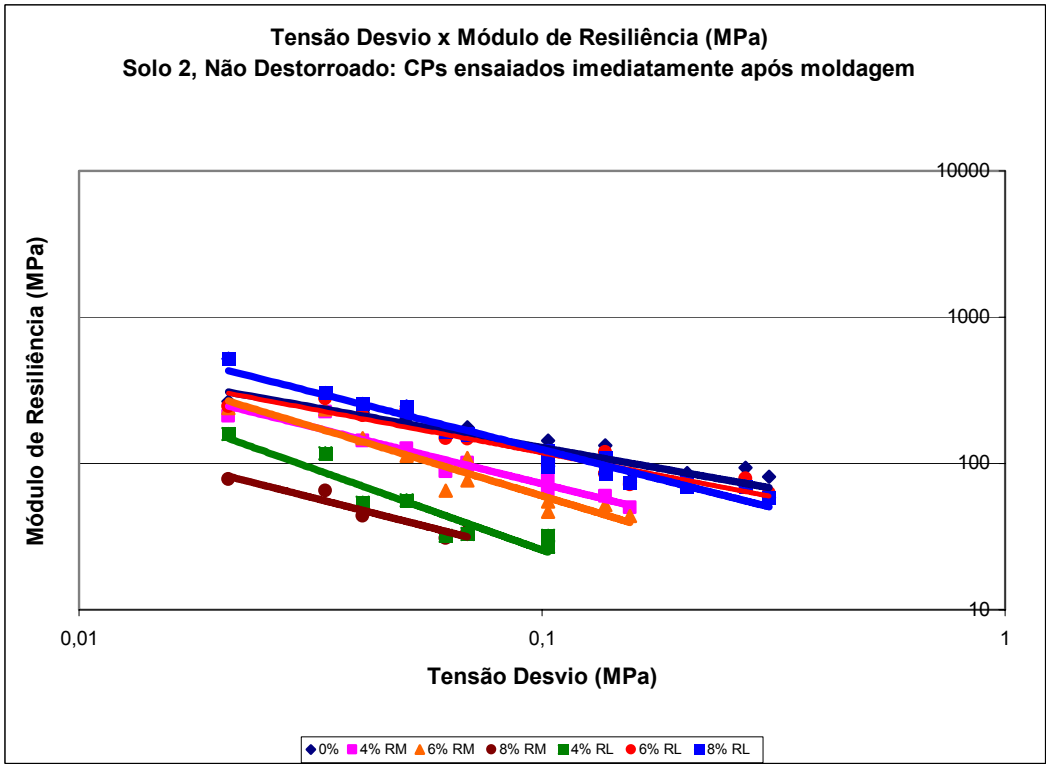
ANEXO B

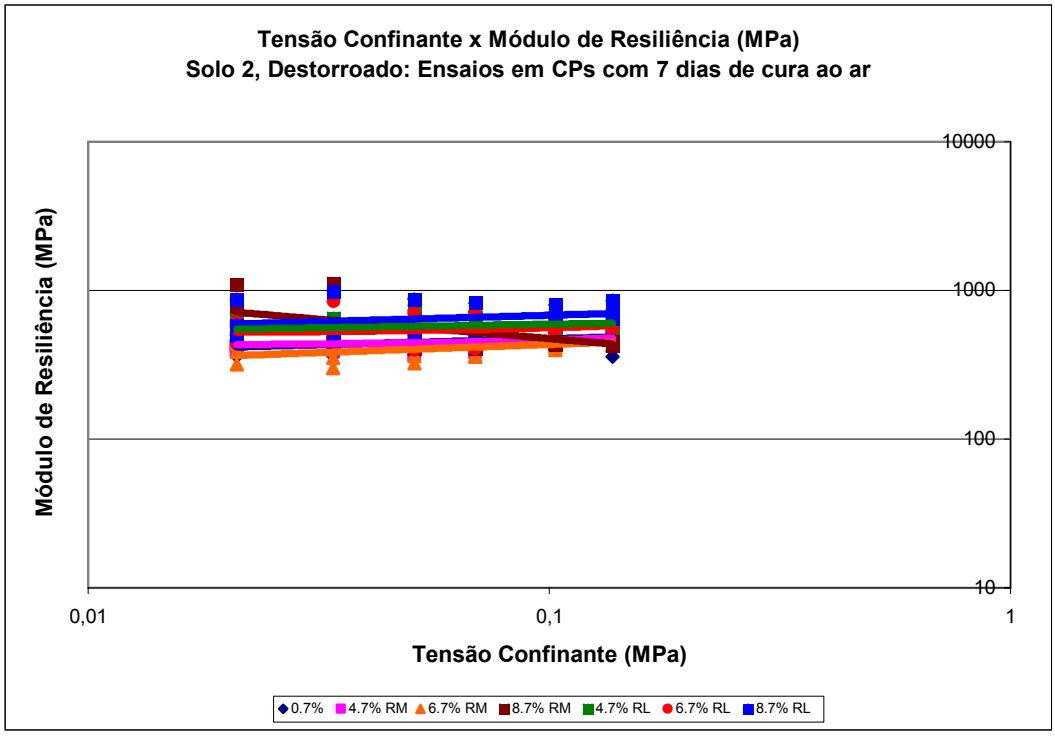
RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA DOS SOLOS – SOLO 2.

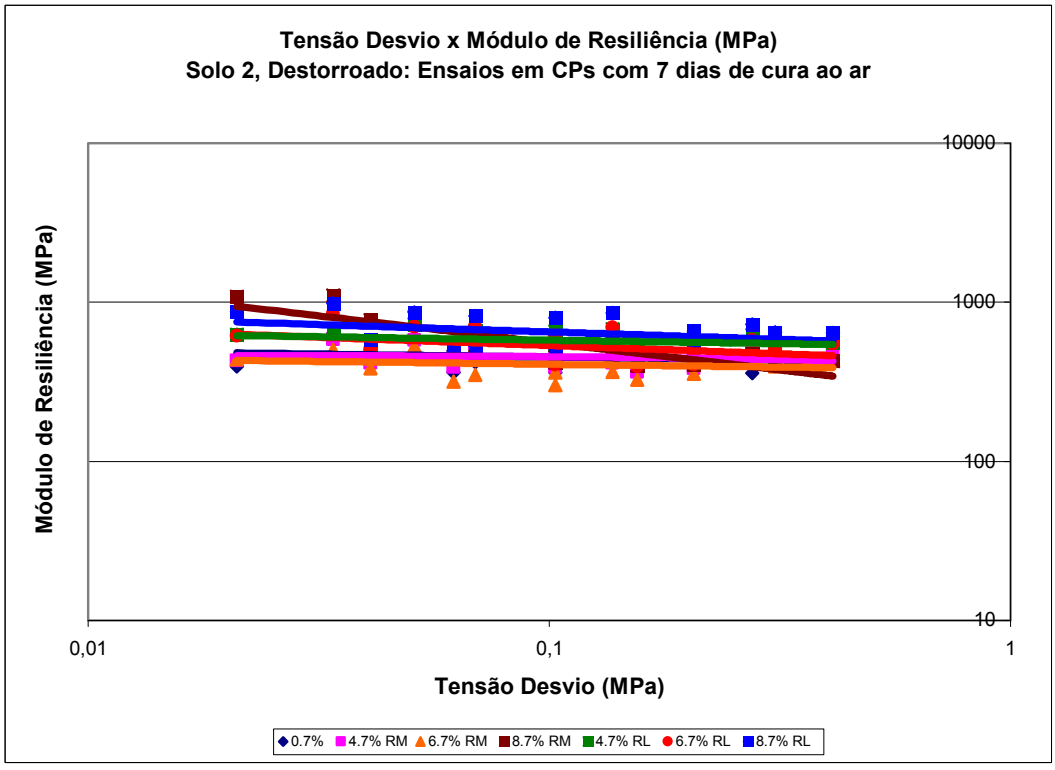

Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 2, Destorroado: CPs ensaiados imediatamente após moldagem
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
0%
4% RM
6% RM
8% RM
4% RL
6% RL
8% RL

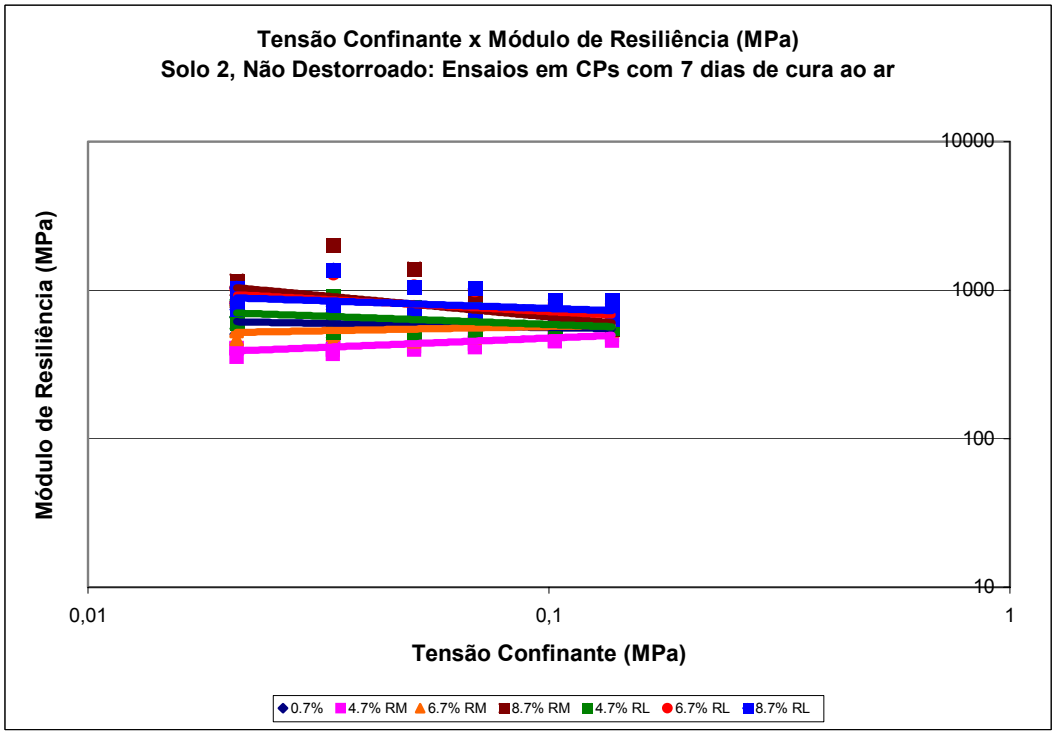

Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 2, Destorroado: CPs ensaiados imediatamente após moldagem
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
0%
4% RM
6% RM
8% RM
4% RL
6% RL
8% RL

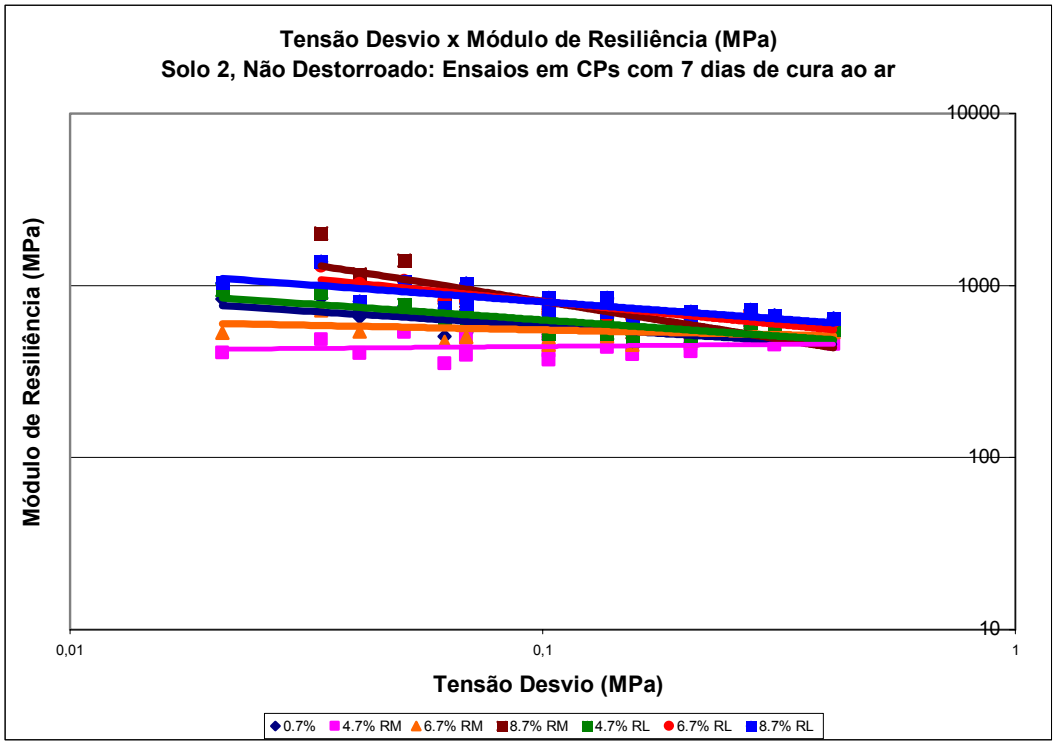

Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 2, Não Destorroado: CPs ensaiados imediatamente após moldagem
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
0%
4% RM
6% RM
8% RM
4% RL
6% RL
8% RL

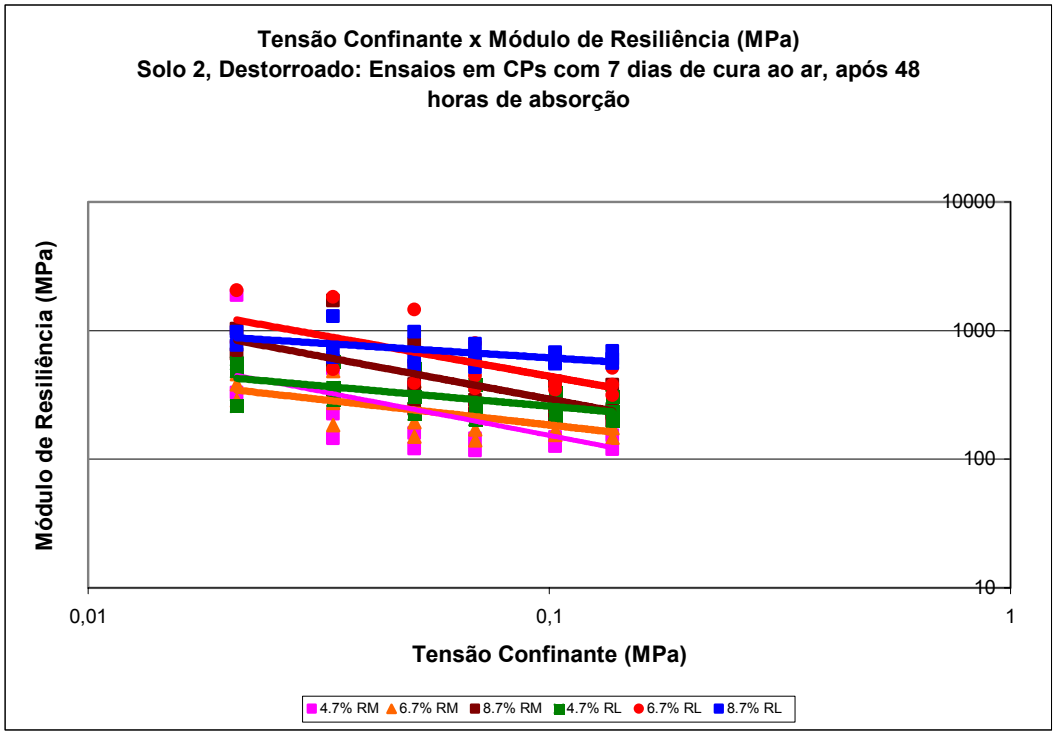

Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 2, Não Destorroado: CPs ensaiados imediatamente após moldagem
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
0%
4% RM
6% RM
8% RM
4% RL
6% RL
8% RL

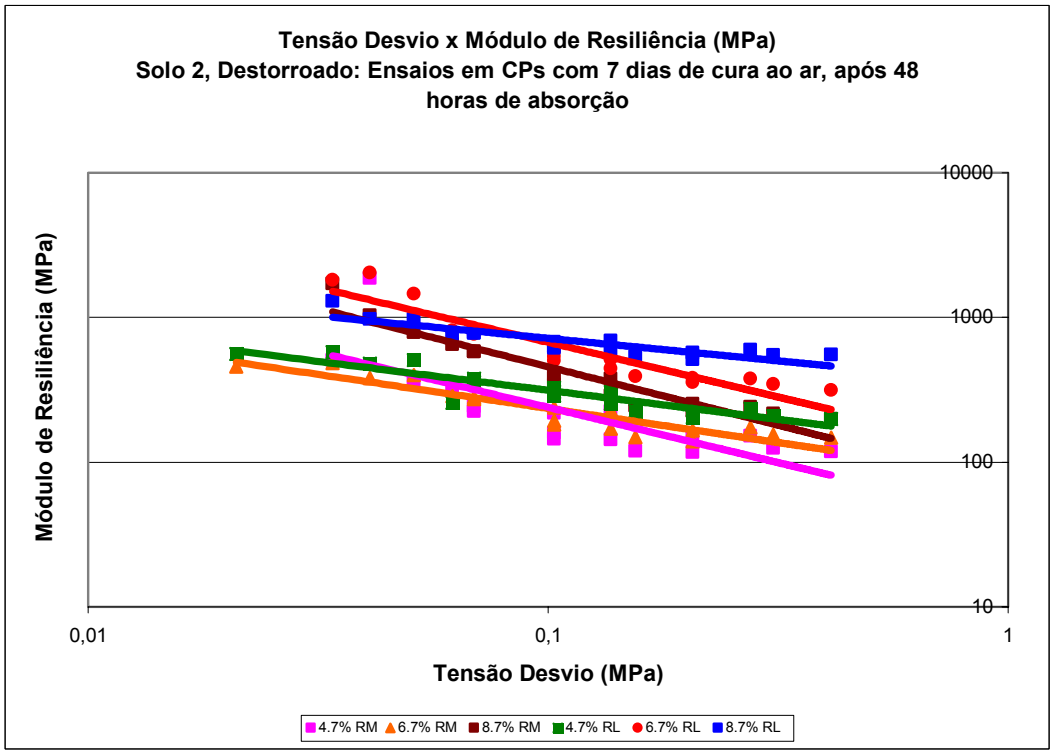

Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 2, Destorroado: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
0.7%
4.7% RM
6.7% RM
8.7% RM
4.7% RL
6.7% RL
8.7% RL

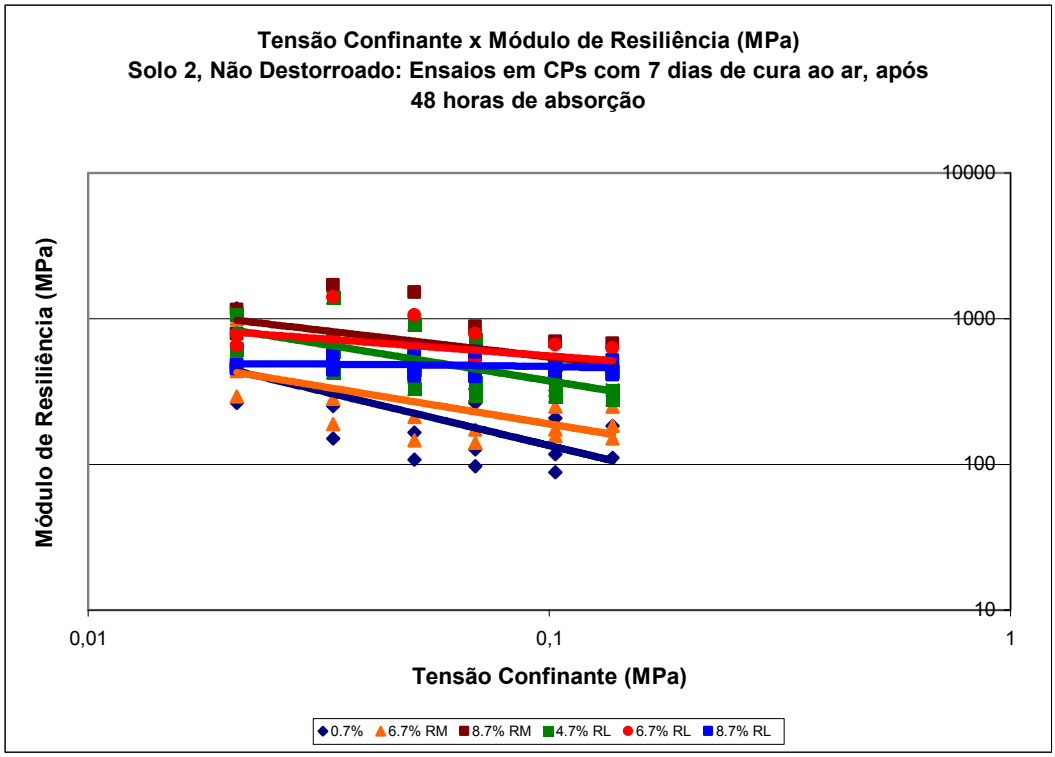

Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 2, Destorroado: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
0.7%
4.7% RM
6.7% RM
8.7% RM
4.7% RL
6.7% RL
8.7% RL

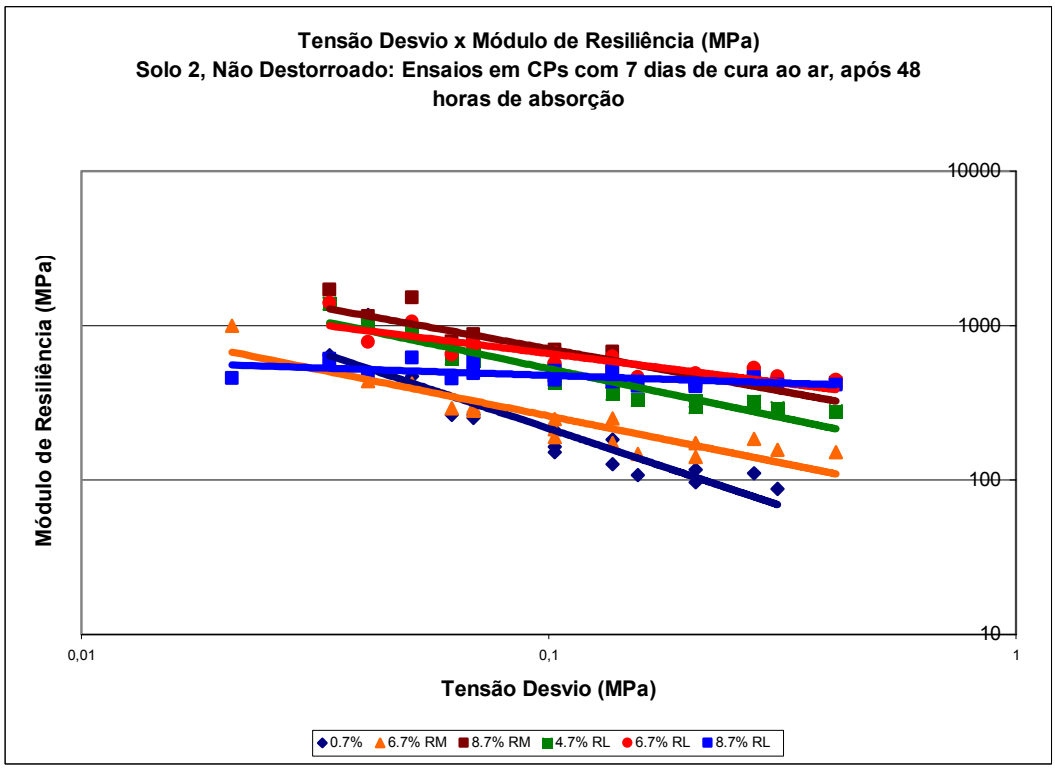

Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 2, Não Destorroado: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
0.7%
4.7% RM
6.7% RM
8.7% RM
4.7% RL
6.7% RL
8.7% RL


Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 2, Não Destorroado: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
0.7%
4.7% RM
6.7% RM
8.7% RM
4.7% RL
6.7% RL
8.7% RL


Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 2, Destorroado: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar, após 48 horas de absorção
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
4.7% RM
6.7% RM
8.7% RM
4.7% RL
6.7% RL
8.7% RL

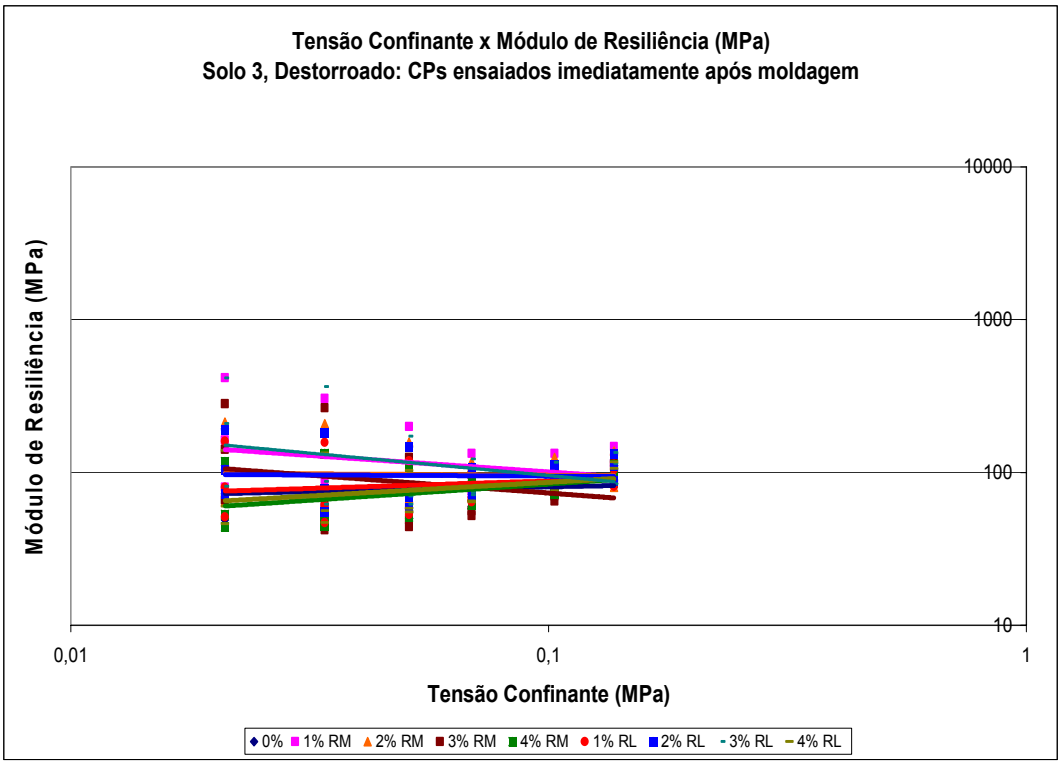

Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 2, Destorroado: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar, após 48 horas de absorção
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
4.7% RM
6.7% RM
8.7% RM
4.7% RL
6.7% RL
8.7% RL

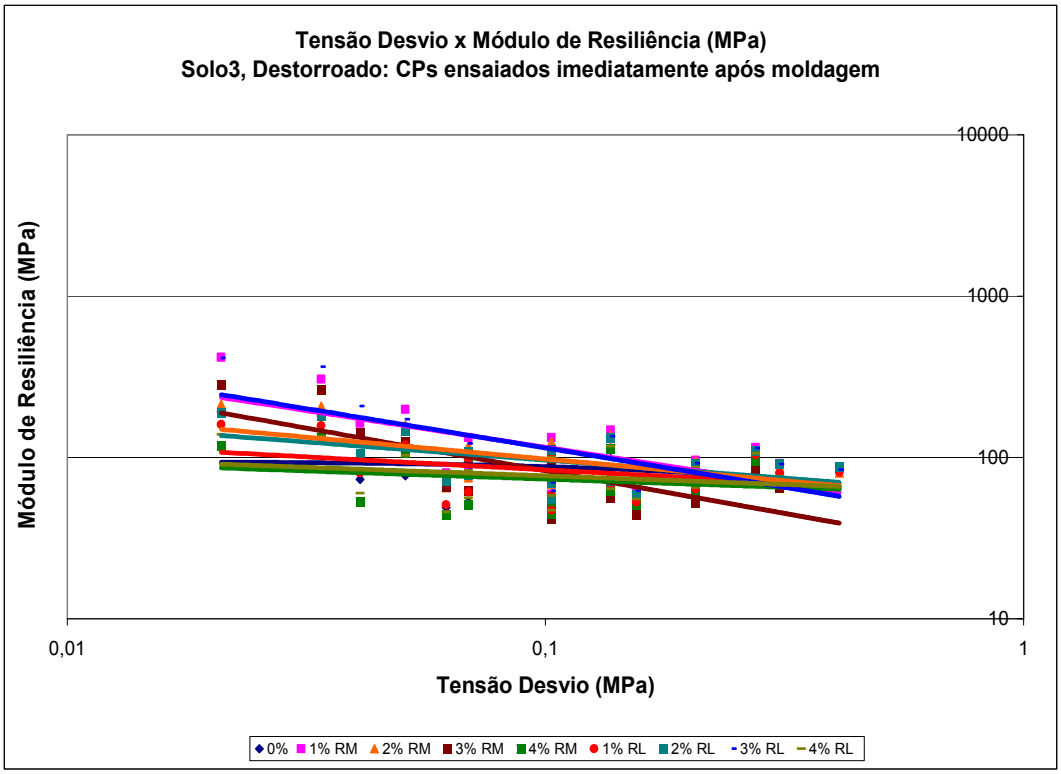

Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 2, Não Destorroado: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar, após 48 horas de absorção
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
0.7%
6.7% RM
8.7% RM
4.7% RL
6.7% RL
8.7% RL

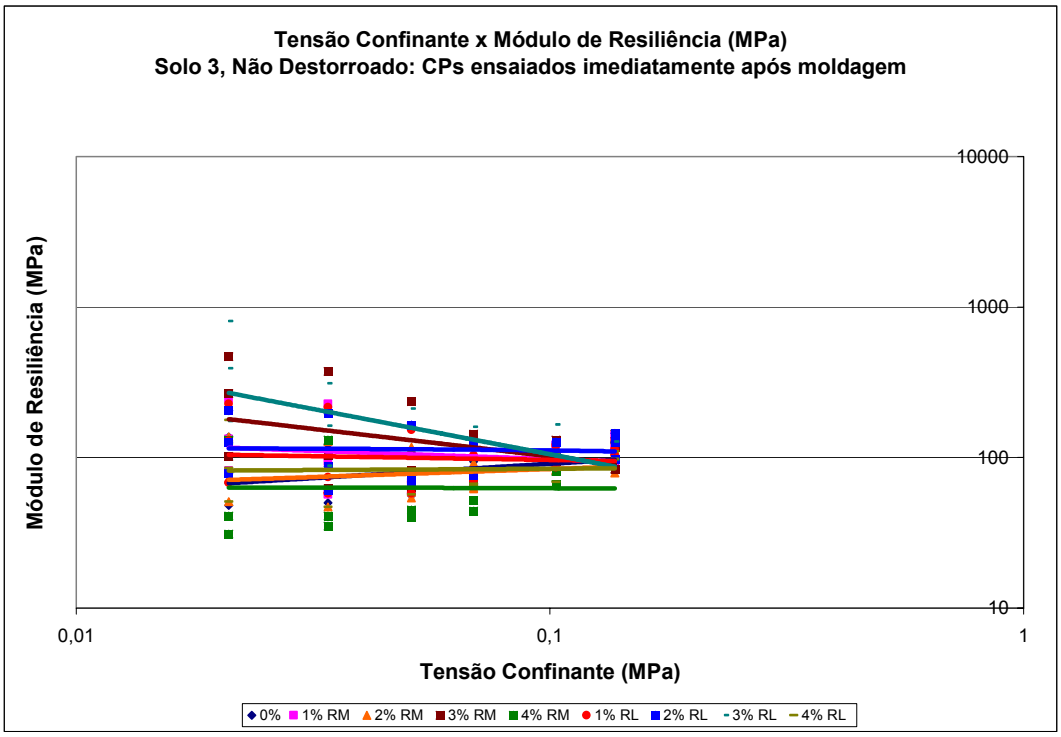

Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 2, Não Destorroado: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar, após 48 horas de absorção
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
0.7%
6.7% RM
8.7% RM
4.7% RL
6.7% RL
8.7% RL

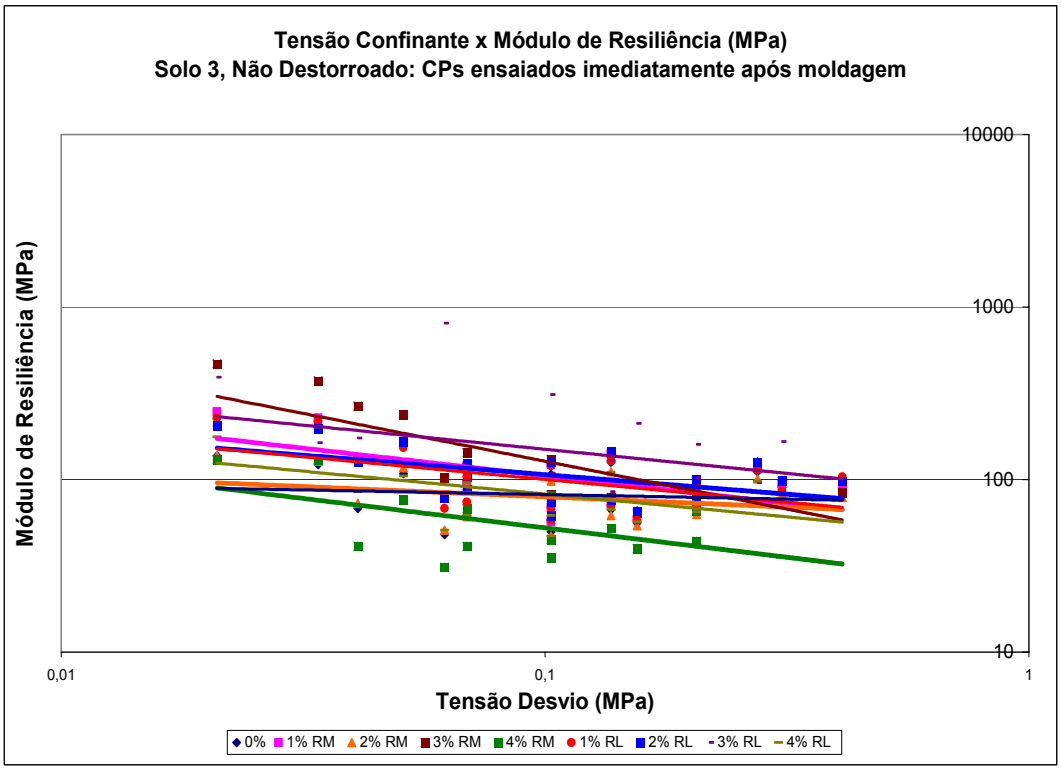
ANEXO C

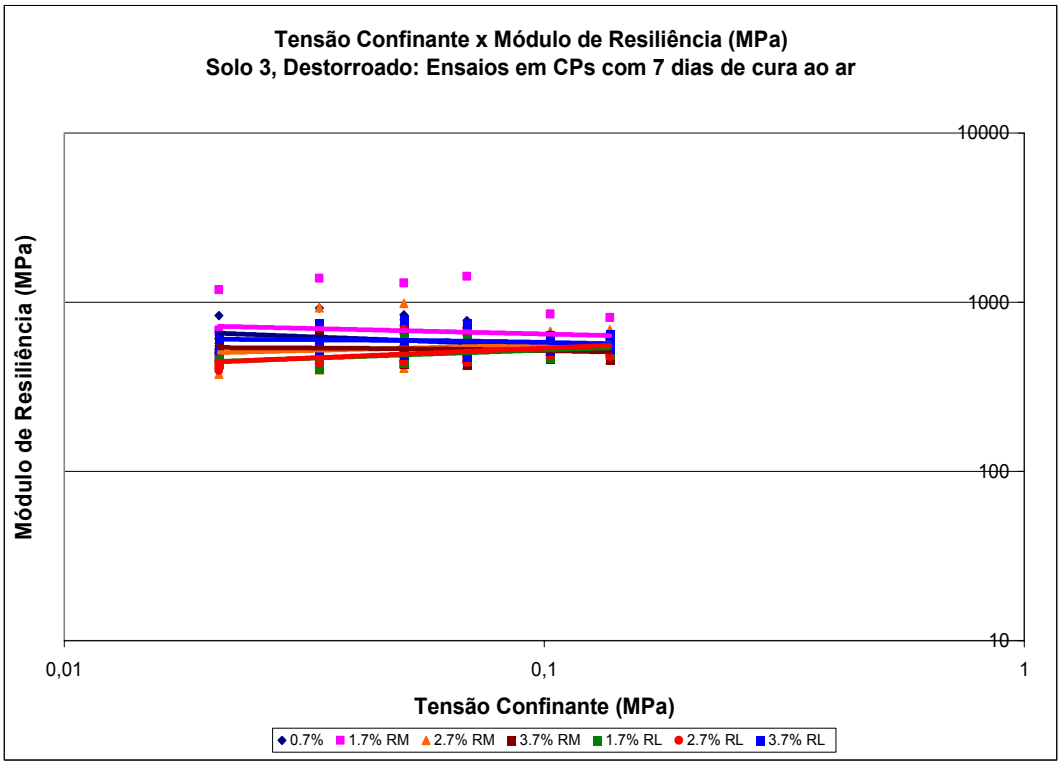
RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA DOS SOLOS – SOLO 3

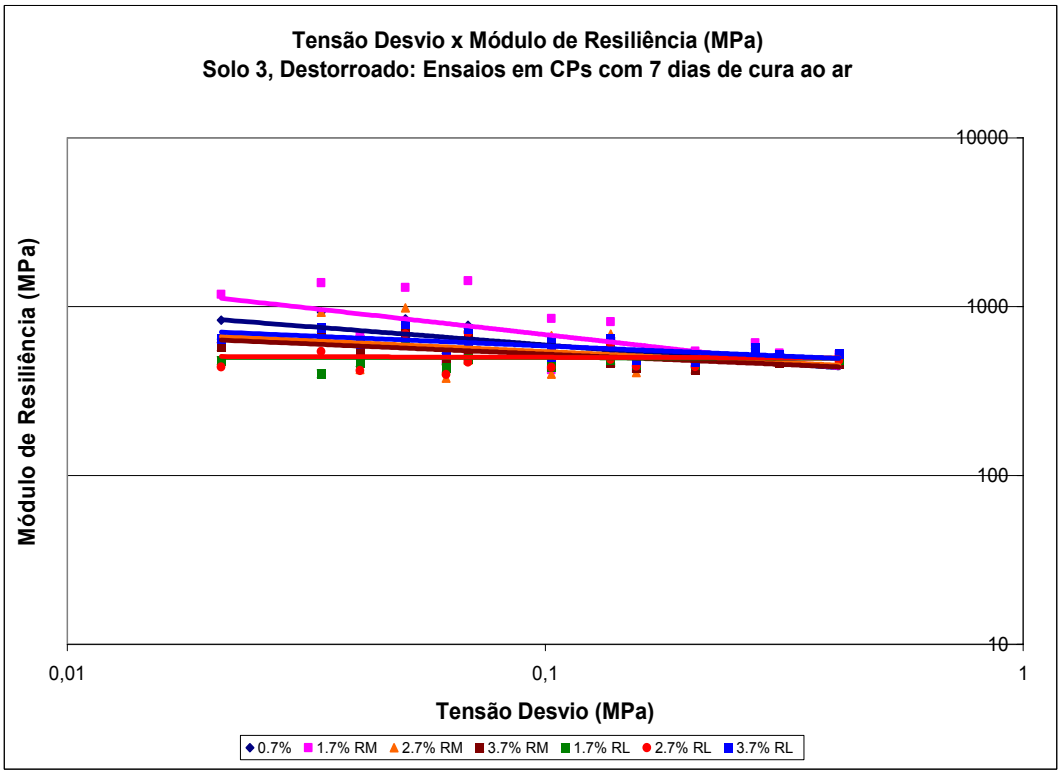

Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 3, Destorroado: CPs ensaiados imediatamente após moldagem
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
0% 1% RM 2% RM 3% RM 4% RM 1% RL 2% RL 3% RL 4% RL

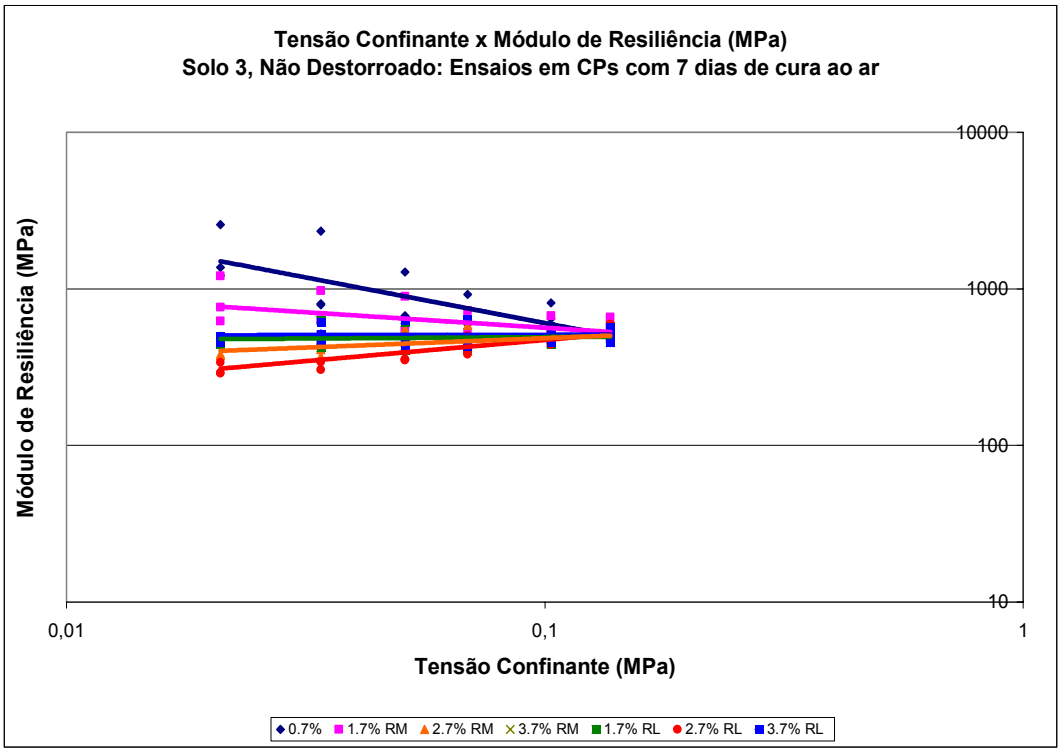

Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo3, Destorroado: CPs ensaiados imediatamente após moldagem
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
0% 1% RM 2% RM 3% RM 4% RM 1% RL 2% RL 3% RL 4% RL

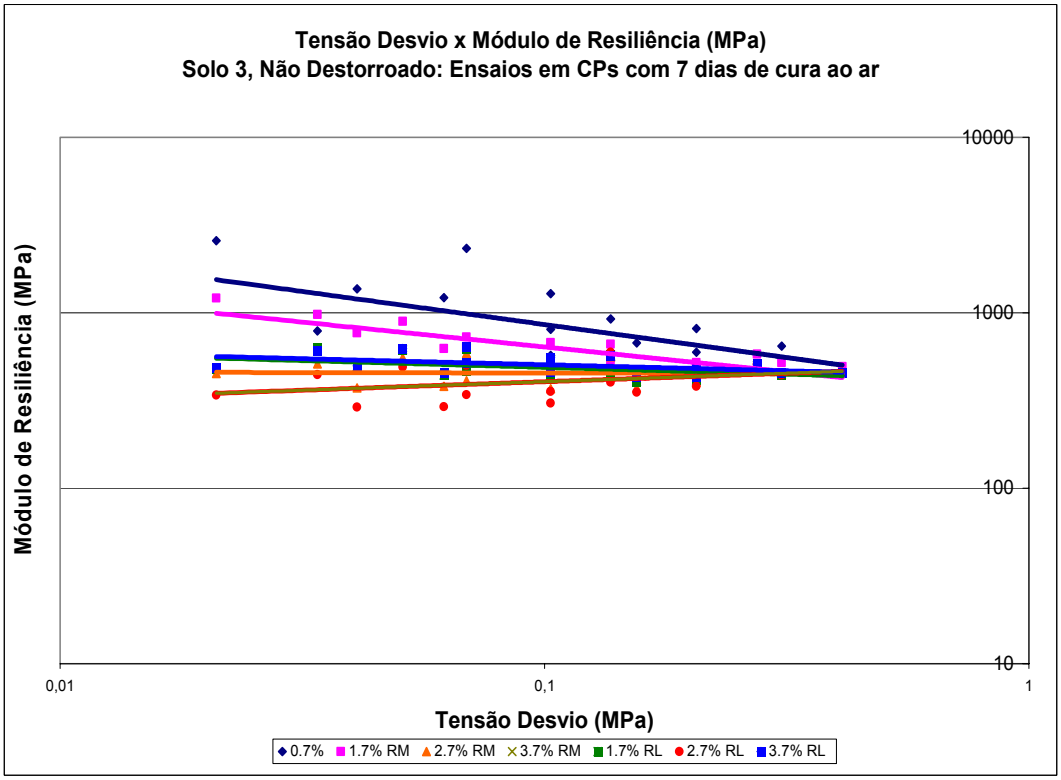

Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 3, Não Destorroado: CPs ensaiados imediatamente após moldagem
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
0% 1% RM 2% RM 3% RM 4% RM 1% RL 2% RL 3% RL 4% RL

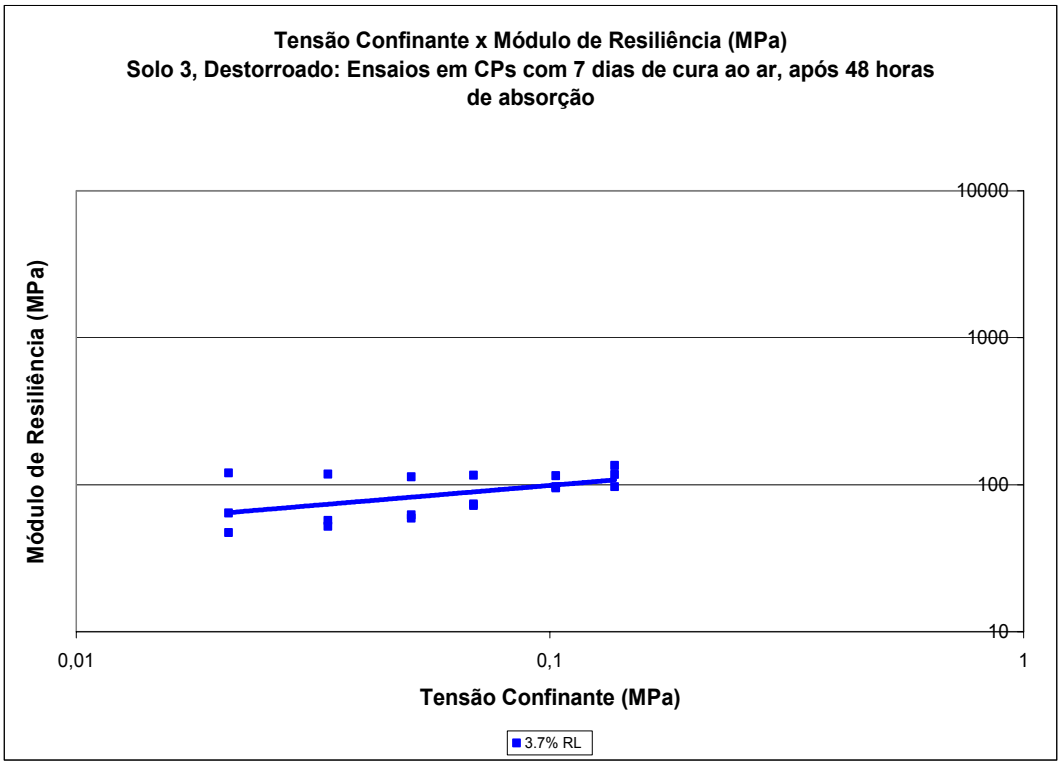

Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 3, Não Destorroado: CPs ensaiados imediatamente após moldagem
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
0% 1% RM 2% RM 3% RM 4% RM 1% RL 2% RL 3% RL 4% RL

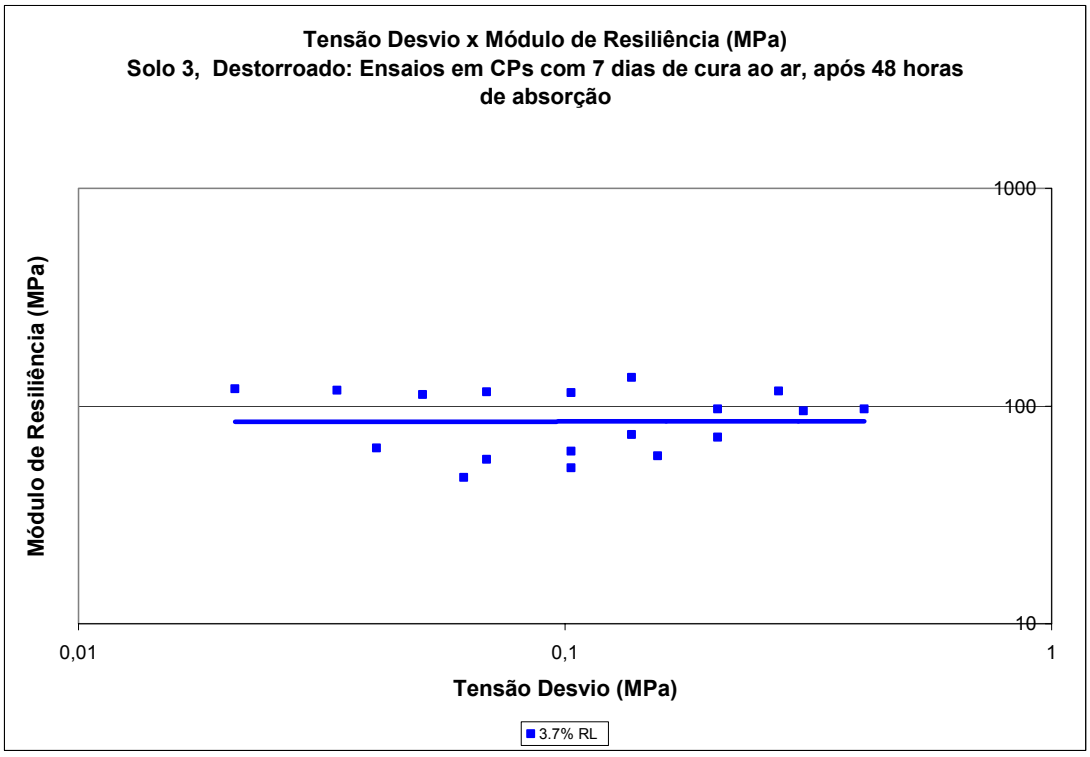

Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 3, Destorroado: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
0.7%
1.7% RM
2.7% RM
3.7% RM
1.7% RL
2.7% RL
3.7% RL

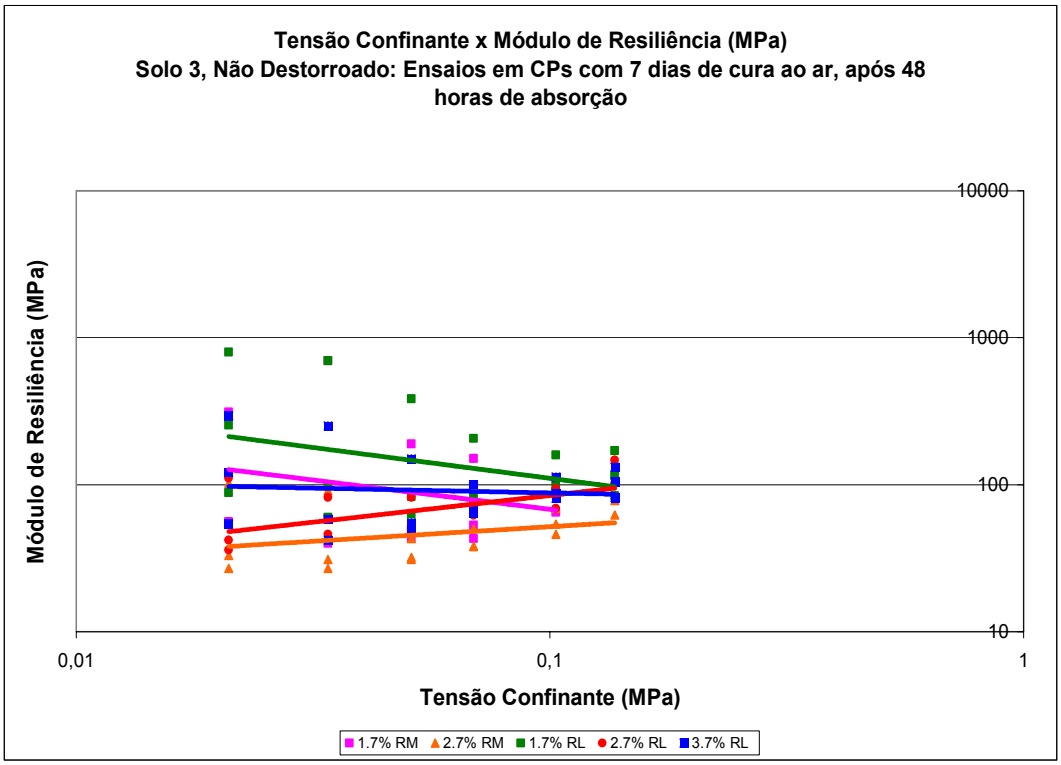

Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 3, Destorroado: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
0.7%
1.7% RM
2.7% RM
3.7% RM
1.7% RL
2.7% RL
3.7% RL

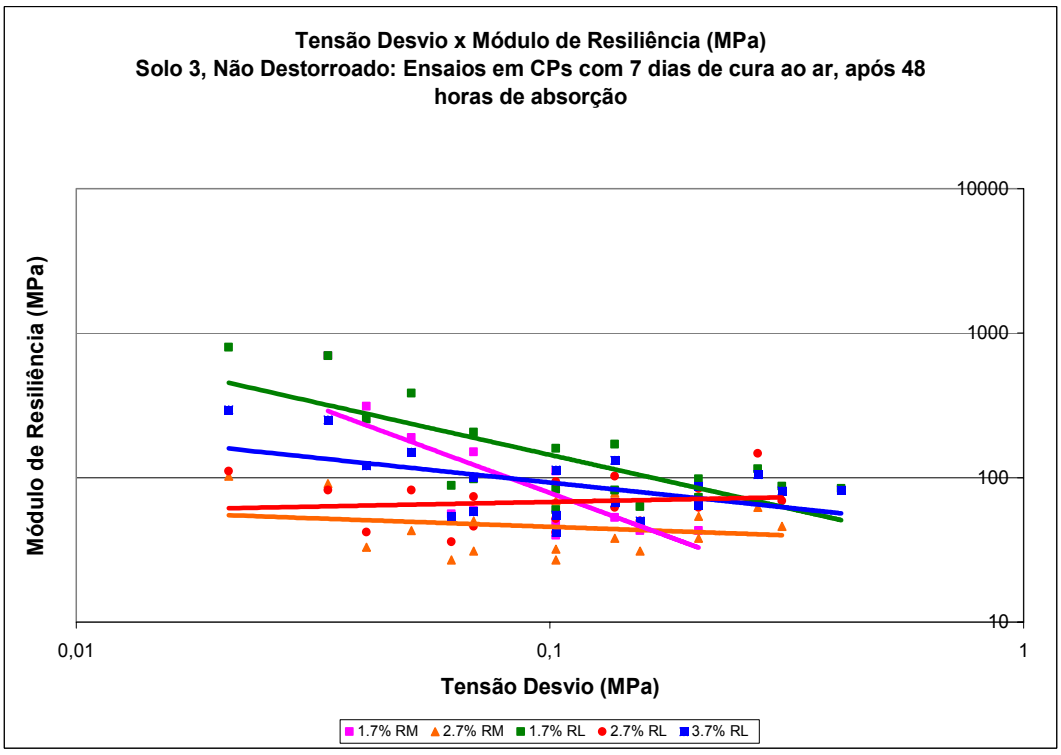

Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 3, Não Destorroado: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
0.7%
1.7% RM
2.7% RM
3.7% RM
1.7% RL
2.7% RL
3.7% RL


Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 3, Não Destorroado: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
0.7%
1.7% RM
2.7% RM
3.7% RM
1.7% RL
2.7% RL
3.7% RL


Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 3, Destorroado: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar, após 48 horas de absorção
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
3.7% RL


Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 3, Destorroado: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar, após 48 horas de absorção
Módulo de Resiliência (MPa)
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
3.7% RL


Tensão Confinante x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 3, Não Destorroado: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar, após 48 horas de absorção
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Confinante (MPa)
1.7% RM
2.7% RM
1.7% RL
2.7% RL
3.7% RL


Tensão Desvio x Módulo de Resiliência (MPa)
Solo 3, Não Destorroado: Ensaios em CPs com 7 dias de cura ao ar, após 48 horas de absorção
Módulo de Resiliência (MPa)
10000
1000
100
10
0,01
0,1
1
Tensão Desvio (MPa)
1.7% RM
2.7% RM
1.7% RL
2.7% RL
3.7% RL

ANEXO D

FOTOS DOS ENSAIOS LWT – SOLOS 2 E 3.

- **SOLO 2**

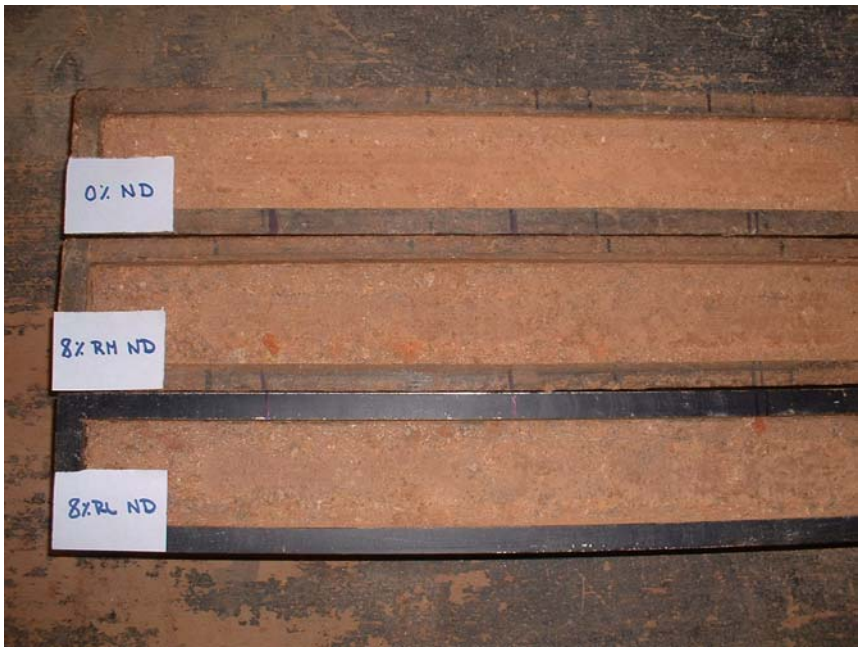


Figura D.1 – Corpos-de-prova após o ensaio LWT

Figura D.2 – Corpos-de-prova sem emulsão após o ensaio LWT.

Figura D.3 – Corpos-de-prova com 8% de emulsão RM, após o ensaio LWT

Figura D.4 – Corpos-de-prova com 8% de emulsão RL, após o ensaio LWT

- **SOLO 3**

Figura D.5 – Corpos-de-prova de solo destorroado com diferentes teores de emulsão, após o ensaio LWT

Figura D.6 – Corpos-de-prova de solo não destorroado com diferentes teores de emulsão, após o ensaio LWT

Figura D.7 – Corpos-de-prova sem adição de emulsão, após o ensaio LWT

Figura D.8 – Corpos-de-prova com adição de distintos teores de emulsão RM, em solo destorroado e não destorroado, após o ensaio LWT

Figura D.9 – Corpos-de-prova com adição de 3% de emulsão RL, após o ensaio LWT

ANEXO E

FOTOS DOS ENSAIOS WTAT – SOLOS 2 E 3.

- **SOLO 2**

Figura E.1 – Corpo-de-prova sem adição de emulsão antes do ensaio WTAT.

Figura E.2 – Corpo-de-prova com 8% de emulsão RM no solo destorroado, após o ensaio WTAT.

- **SOLO 3**

Figura E.3 – Corpos-de-prova com adição de diferentes teores de emulsão, após o ensaio WTAT.

ANEXO F

PLANILHA DOS RESULTADOS DO FEPAVE – SOLOS 1, 2 E 3.

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 1 - Estrutura 1**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 02:50:51h - FEPAVE - Proj0230**

TEMPO PROC: **0,71 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,02**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**500**
2	**0,15**	**0**	**0**	**6**	**222,9**	**-0,0522**	**0**	**0**	**0**
3	**4**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**50**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-99,63279**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**-0,000797**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,1069807**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1233443**	MPa
Tensão no Revestimento:	**0,4758259**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,253034	0,141463 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 1 - Estrutura 2**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 02:59:59h - FEPAVE - Proj0232**

TEMPO PROC: **2,13 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,02**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**500**
2	**0,15**	**0**	**0**	**5**	**505,7**	**0,0277**	**0**	**0**	**0**
3	**4,32**	**0**	**0**	**5**	**222,9**	**-0,0522**	**0**	**0**	**0**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-26,02778**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**-0,000404**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,3620378**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1739394**	MPa
Tensão no Revestimento:	**0,223519**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,308345	0,171306 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 1 - Estrutura 2**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 18:53:28h - FEPAVE - Proj0262**

TEMPO PROC: **6,47 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,02**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**500**
2	**0,15**	**0**	**0**	**5**	**505,7**	**0,0277**	**0**	**0**	**0**
3	**4,32**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**50**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-89,63358**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**-0,000603**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,2781054**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1089648**	MPa
Tensão no Revestimento:	**0,3303802**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,243999	0,130111 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 1 - Estrutura 2 (Após Abs.)**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 03:11:07h - FEPAVE - Proj0234**

TEMPO PROC: **2,17 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,02**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**500**
2	**0,15**	**0**	**0**	**5**	**322,9**	**-0,0749**	**0**	**0**	**0**
3	**4,32**	**0**	**0**	**5**	**222,9**	**-0,0522**	**0**	**0**	**0**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-27,25271**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**-0,000432**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,3436848**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1765294**	MPa
Tensão no Revestimento:	**0,2433463**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,306994	0,174814 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco
em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 1 - Estrutura 2 (Após Abs.)**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**
TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**
UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 21:10:38h - FEPAVE - Proj0268**
TEMPO PROC: **8,95 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,02**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**500**
2	**0,15**	**0**	**0**	**5**	**322,9**	**-0,0749**	**0**	**0**	**0**
3	**4,32**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**50**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**
Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa
Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-92,63656**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**-0,000642**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,2526387**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1139811**	MPa
Tensão no Revestimento:	**0,3566762**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,247095	0,134094 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 1 - Estrutura 3**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 03:03:54h - FEPAVE - Proj0233**

TEMPO PROC: **1,99 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,15**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**584**
2	**4,32**	**0**	**0**	**5**	**222,9**	**-0,0522**	**0**	**0**	**0**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-25,39856**	centésimo de mm	
Deformação Específica de Tração:	**0,0001301**		
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,3122309**	MPa	
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1917059**	MPa	
Tensão no Revestimento:	**-0,051029**	MPa	
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,241666	0,158163	MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco
em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 1 - Estrutura 3**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**
TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**
UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 18:56:25h - FEPAVE - Proj0263**
TEMPO PROC: **1,96 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,15**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**584**
2	**4,32**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**50**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**
Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa
Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-90,81579**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**0,0005106**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,3641186**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1204425**	MPa
Tensão no Revestimento:	**-0,190375**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,163719	0,110498 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 1 - Estrutura 3 (Após Abs.)**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 03:16:38h - FEPAVE - Proj0237**

TEMPO PROC: **2,29 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,15**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**469**
2	**4,32**	**0**	**0**	**5**	**222,9**	**-0,0522**	**0**	**0**	**0**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-26,7674**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**0,0001232**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,3120807**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,2009282**	MPa
Tensão no Revestimento:	**-0,039886**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,251306	0,163207 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco
em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 1 - Estrutura 3 (Após Abs.)**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**
TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**
UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 21:12:06h - FEPAVE - Proj0269**
TEMPO PROC: **1,83 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,15**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**469**
2	**4,32**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**50**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**
Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa
Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-95,56153**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**0,0005699**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,3526283**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,12911**	MPa
Tensão no Revestimento:	**-0,168561**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,173464	0,117687 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 2 - Estrutura 1**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 23:08:18h - FEPAVE - Proj0272**

TEMPO PROC: **5,00 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,02**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**500**
2	**0,15**	**0**	**0**	**6**	**40,2**	**-0,5665**	**0**	**0**	**0**
3	**4,32**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**50**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-101,1806**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**-0,000519**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,2578277**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1241188**	MPa
Tensão no Revestimento:	**0,3538279**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,246133	0,141769 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 2 - Estrutura 2**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 03:30:01h - FEPAVE - Proj0239**

TEMPO PROC: **2,14 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,02**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**500**
2	**0,15**	**0**	**0**	**6**	**592,3**	**-0,1046**	**0**	**0**	**0**
3	**4,32**	**0**	**0**	**6**	**40,2**	**-0,5665**	**0**	**0**	**0**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-18,77688**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**-0,000328**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,4001281**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1525704**	MPa
Tensão no Revestimento:	**0,1784167**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,293911	0,165043 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 2 - Estrutura 2**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 19:09:43h - FEPAVE - Proj0264**

TEMPO PROC: **2,45 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,02**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**500**
2	**0,15**	**0**	**0**	**6**	**592,3**	**-0,1046**	**0**	**0**	**0**
3	**4,32**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**50**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-79,51824**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**-0,000493**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,3366707**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,0956604**	MPa
Tensão no Revestimento:	**0,2661318**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,234875	0,117966 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 2 - Estrutura 3 (Após abs)**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 03:35:57h - FEPAVE - Proj0241**

TEMPO PROC: **2,24 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,02**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**500**
2	**0,15**	**0**	**0**	**6**	**435,8**	**-0,0294**	**0**	**0**	**0**
3	**4,32**	**0**	**0**	**6**	**40,2**	**-0,5665**	**0**	**0**	**0**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-21,7871**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**-0,000401**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,360921**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1646105**	MPa
Tensão no Revestimento:	**0,2224923**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,300612	0,173837 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 2 - Estrutura 3 (Após abs)**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 21:46:01h - FEPAVE - Proj0270**

TEMPO PROC: **2,80 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,02**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**500**
2	**0,15**	**0**	**0**	**6**	**435,8**	**-0,0294**	**0**	**0**	**0**
3	**4,32**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**50**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-89,24227**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**-0,000608**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,2748364**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1088444**	MPa
Tensão no Revestimento:	**0,3328568**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,243802	0,129811 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 2 - Estrutura 3**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 03:33:02h - FEPAVE - Proj0240**

TEMPO PROC: **1,83 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,15**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1028**
2	**4,32**	**0**	**0**	**6**	**40,2**	**-0,5665**	**0**	**0**	**0**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-18,38251**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**0,0001369**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,310195**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1584312**	MPa
Tensão no Revestimento:	**-0,088706**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,20769	0,147135 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 2 - Estrutura 3**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 19:11:04h - FEPAVE - Proj0265**

TEMPO PROC: **2,23 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,15**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1028**
2	**4,32**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**50**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-78,82544**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**0,0003812**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,3973961**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,0992547**	MPa
Tensão no Revestimento:	**-0,24966**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,139104	0,092046 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco
em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 2 - Estrutura III, (A. abs)**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**
TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**
UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 02 dez 2007 às 00:36:05h - FEPAVE - Proj0280**
TEMPO PROC: **2,89 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,15**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**590**
2	**4,32**	**0**	**0**	**6**	**40,2**	**-0,5665**	**0**	**0**	**0**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**
Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa
Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-21,27258**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**0,0001455**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,3037872**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1798422**	MPa
Tensão no Revestimento:	**-0,055735**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,230698	0,160573 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco
em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 2 - Estrutura 3 (Após abs)**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**
TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**
UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 21:47:17h - FEPAVE - Proj0271**
TEMPO PROC: **1,72 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,15**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**590**
2	**4,32**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**50**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**
Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa
Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-90,6144**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**0,0005102**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,3640985**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1199933**	MPa
Tensão no Revestimento:	**-0,190972**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,163208	0,110161 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 3 - Estrutura 1**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 27 out 2007 às 03:44:27h - FEPAVE - Proj0243**

TEMPO PROC: **2,15 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,02**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**500**
2	**0,15**	**0**	**0**	**5**	**141,3**	**0,1912**	**0**	**0**	**0**
3	**4,32**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**50**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-127,1065**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**-0,000485**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,2677934**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,144807**	MPa
Tensão no Revestimento:	**0,3660141**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,264164	0,157137 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 3 - Estrutura 2**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 02 dez 2007 às 00:48:16h - FEPAVE - Proj0281**

TEMPO PROC: **10,23 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,02**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**500**
2	**0,15**	**0**	**0**	**1**	**556**	**-0,0673**	**0**	**0**	**0**
3	**4,32**	**0**	**0**	**1**	**141,3**	**-0,1912**	**0**	**0**	**0**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-21,1947**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**-0,000336**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,3955792**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1688969**	MPa
Tensão no Revestimento:	**0,1837343**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,306797	0,167814 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco
em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 3 - Estrutura 2, SL50**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**
TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**
UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 02 dez 2007 às 00:55:23h - FEPAVE - Proj0282**
TEMPO PROC: **2,84 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,02**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**500**
2	**0,15**	**0**	**0**	**1**	**556**	**-0,0673**	**0**	**0**	**0**
3	**4,32**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**50**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**
Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa
Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-82,14434**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**-0,000523**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,3191809**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,0983723**	MPa
Tensão no Revestimento:	**0,2828993**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,236917	0,1212 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 3 - Estrutura 3**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 02 dez 2007 às 01:03:59h - FEPAVE - Proj0284**

TEMPO PROC: **3,42 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,15**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1420**
2	**4,32**	**0**	**0**	**1**	**141,3**	**-0,1912**	**0**	**0**	**0**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-18,72219**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**0,0001153**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,3254186**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1588264**	MPa
Tensão no Revestimento:	**-0,104333**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,206521	0,138393 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 3 – Estrutura 3, SL50**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 02 dez 2007 às 01:06:38h - FEPAVE - Proj0285**

TEMPO PROC: **2,28 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,15**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1420**
2	**4,32**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**50**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-72,15055**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**0,0003156**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,4226312**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,0891556**	MPa
Tensão no Revestimento:	**-0,286912**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,127081	0,081916 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 3 - Estrutura 2 (20cm)**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 02 dez 2007 às 01:09:47h - FEPAVE - Proj0286**

TEMPO PROC: **2,57 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,02**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**500**
2	**0,2**	**0**	**0**	**1**	**556**	**-0,0673**	**0**	**0**	**0**
3	**4,32**	**0**	**0**	**1**	**141,3**	**-0,1912**	**0**	**0**	**0**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-19,8005**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**-0,000311**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,3999323**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1210702**	MPa
Tensão no Revestimento:	**0,1732295**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,153347	0,127755 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 3 - Estrutura 2 (20cm), SL50**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 02 dez 2007 às 01:11:44h - FEPAVE - Proj0288**

TEMPO PROC: **2,14 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,02**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**500**
2	**0,2**	**0**	**0**	**1**	**556**	**-0,0673**	**0**	**0**	**0**
3	**4,32**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**50**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-70,33277**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**-0,000448**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,3352484**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,0708627**	MPa
Tensão no Revestimento:	**0,2489587**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,096894	0,077103 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 3 - Estrutura 3 (20cm)**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 02 dez 2007 às 01:13:52h - FEPAVE - Proj0289**

TEMPO PROC: **1,98 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,2**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1420**
2	**4,32**	**0**	**0**	**1**	**141,3**	**-0,1912**	**0**	**0**	**0**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-16,70966**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**0,0000822**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,2376786**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,1119288**	MPa
Tensão no Revestimento:	**-0,080528**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,144485	0,115031 MPa

COPPE - UFRJ

Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **Solo 3 - Estrutura 3 (20cm), SL 50**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 02 dez 2007 às 01:15:37h - FEPAVE - Proj0290**

TEMPO PROC: **2,01 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	**0,2**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1420**
2	**4,32**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**	**0**	**50**

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	**-59,9971**	centésimo de mm
Deformação Específica de Tração:	**0,0002047**	
Diferença de Tensões no Revestimento:	**0,2920236**	MPa
Tensão Vertical no Subleito:	**0,0640484**	MPa
Tensão no Revestimento:	**-0,191642**	MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,088867	0,064506 MPa