DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Ricardo e Mimi

AGRADECIMENTOS

À Deus por guiar meu caminho e me dar forças para seguir sempre em frente.

Aos meus pais e irmãos, a quem dedico as minhas alegrias e meu trabalho pelo carinho e incentivo ao longo de todas as etapas de minha vida.

Ao professor Alexandre Benetti Parreira pelo incentivo, orientação e aportes para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao professor Glauco Túlio Pessa Fabbri por seus aportes e conselhos para a realização deste trabalho.

Ao Rômulo Constantino e à Betunel Asfaltos, pelo apoio incondicional e pelo incentivo para o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os professores, alunos, e funcionários do Departamento de Transportes, pela colaboração durante a minha permanência no Brasil.

Ao pessoal do laboratório do departamento de transportes da EESC/USP, Gigante, Paulo e João, pela ajuda na execução dos ensaios de laboratório.

À Vanessa, pela ajuda incondicional oferecida em todo momento e em especial pela sua paciência e grande amizade.

Aos meus amigos Jorge, Bruno, Chili, Vivian, Mateus, Paulo, David, Walter, Francis, pela ajuda na correção do texto e aportes feitos para realização deste trabalho.

Ao pessoal da minha república, Luiz, Jorge e Gustavo pela grande amizade.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos utilizada para realização desta pesquisa.

RESUMO

SUAREZ D. A. A. (2008). *Estudo do comportamento mecânico de dois solos lateríticos do Estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica.* São Carlos 2008. 144p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

O objetivo principal desta dissertação é determinar, a partir de ensaios de laboratório, o comportamento mecânico de misturas constituídas com solos lateríticos arenoso e argiloso e emulsão asfáltica, visando a sua utilização na construção rodoviária. Utilizou-se na compactação a energia normal do Proctor, e analisaram-se os efeitos do tipo de solo, o teor e tipo de emulsão, tipo de cura pré e pós-compactação, tempo de cura e a imersão em água na resistência e rigidez das misturas. Foram realizados ensaios para a determinação da resistência à compressão simples, resistência à compressão diametral, módulo de resiliência, índice de suporte Califórnia e variação volumétrica durante a cura e imersão dos corpos-de-prova. Os resultados mostraram que as misturas com emulsão apresentaram resistência e rigidez superiores às dos solos *in natura*, e ainda menores variações volumétricas decorrentes da secagem e da imersão dos corpos-de-prova em água. Finalmente, concluiu-se que a aplicação das emulsões asfálticas é promissora na área de pavimentação, dado que proporciona às misturas propriedades físicas e mecânicas para estas serem aplicáveis na construção rodoviária.

Palavras-chave: Pavimentação, Solos lateríticos, Emulsão asfáltica, Solo-emulsão, Estabilização de solos, Comportamento mecânico.

ABSTRACT

SUAREZ D. A. A. (2008). Study of the mechanical performance of two lateritics soils from the State of São Paulo when mixed with asphalt emulsion. São Carlos 2008. 144p. Master in Science thesis. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

This work has the main objective of studying, based on laboratory tests, the mechanical behavior of sand and clay lateritics soils and the asphalt emulsion in focus mixtures, seeking their utilization in road construction. Were compacted at the normal Proctor energy, analyzing the soil type, the asphaltic emulsion rate and type, the curing pre and pos- compactation, the curing time and the effect of the immersion in water to the mixtures strength and rigidity, afterwards they were submitted to tests to the determination of unconfined compressive strength, indirect tensile strength, modulus resilient, California bearing ratio and volumetric variability of specimens when immersed in water. The results showed that the addition of asphaltic emulsion to soils improve the strength and rigidity of *in natura* and reduction of the volumetric variability caused by drying and immersion in water. soils. Finally, it concludes that bituminous emulsion provides to soils qualities that could be qualified for use in road construction.

Keywords: Pavements, Lateritics soils, Asphalt emulsions, Soil-emulsion, Soil stabilization, Mechanic behavior.

RESUMEN

SUAREZ D. A. A. (2008). Estudio del comportamiento mecánico de dos suelos lateríticos del Estado de São Paulo con la incorporación de emulsión asfáltica. São Carlos 2008. 144p. Disertación de Maestría. Escuela de Ingeniería de São Carlos – Universidad de São Paulo.

El objetivo principal de esta disertación es determinar a través de ensayos de laboratorio, el comportamiento mecánico de mezclas constituidas con suelos lateríticos arenoso y arcilloso, en conjunto con emulsiones asfálticas, proyectando su uso en la construcción de carreteras. La compactación fue realizada con la energía normal Proctor, analizándose el efecto del tipo de suelo, el porcentaje e tipo de emulsión, tipo de cura pre y pos-compactación, el tiempo de cura y la inmersión en agua en la resistencia y rigidez de las mezclas. Las mezclas fueron testadas para determinar la resistencia a compresión simple, resistencia a compresión diametral, modulo resiliente, índice de soporte California y la variación volumétrica durante la cura e inmersión de los cuerpos-de-prueba. Los resultados mostraron que las mezclas con emulsión presentaron resistencia y rigidez superiores a la adquirida para los suelos *in natura*, adicionalmente se observaron menos variaciones volumétricas causadas por el secado e inmersión de los cuerpos-de-prueba en agua. Finalmente, se concluye que el uso de las emulsiones asfáltica tiene una aplicación prometedora en pavimentación ya que proporciona a las mezclas propiedades físicas y mecánicas para su aplicabilidad en la construcción de carreteras.

Palabras llave: Pavimentacion, Suelos lateríticos, Emulsión asfáltica, suelo-emulsión, Estabilización de suelos, comportamiento mecánico.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ação da emulsão asfáltica nas partículas de solo (Fonte: KEZDI, 1979) 35
Figura 2.2 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão para um tempo de aeração da mistura de 4 horas 37
Figura 2.3 – Variação de resistência à compressão simples em função do teor de emulsão para o período de cura de 28 dias exposta ao ar livre 38
Figura 2.4 – Variação da resistência à compressão simples em função do teor de emulsão 39
Figura 2.5 – Módulo de resiliência, das misturas com o solo A-2-4, em função do tempo de cura e teor de emulsão 41
Figura 2.6 – Módulo de resiliência, das misturas com solo A-7-5, em função do tempo de cura e teor de emulsão 42
Figura 2.7 – Módulo de resiliência, das misturas com solo A-7-6, em função do tempo de cura e teor de emulsão 43
Figura 2.8 – Módulo de resiliência, das misturas com solo A-1-b, em função do tempo de cura e teor de emulsão 44
Figura 2.9 – Módulo de resiliência, das misturas com solo A-7-5, em função do tempo de cura e teor de emulsão 45
Figura 2.10 – Módulo de resiliência, das misturas com solo A-2-4, em função do tempo de cura e teor de emulsão 45
Figura 3.1 – Lugares de coleta dos solos 48
Figura 3.2 – Curvas granulométricas dos solos arenoso e argiloso 51
Figura 3.3 – Ábaco da classificação MCT 51
Figura 3.4 – Prensa utilizada para compactação dos corpos de prova 57
Figura 3.5 – Cilindros de bronze utilizado na moldagem dos corpos-de-prova 58
Figura 3.6 – Cilindros de aço utilizado na moldagem dos corpos-de-prova 59
Figura 3.7 – Macacos hidráulicos utilizados na moldagem dos corpos-de-prova 59
Figura 3.8 – Cura dos corpos de prova na câmara úmida 60
Figura 3.9 – Visão geral da prensa utilizada para os ensaios triaxiais cíclicos 62
Figura 3.10 – Corpo de prova instalado na base da câmara triaxia 63
Figura 3.11 – Prensa utilizada para os ensaios de compressão simples 65
Figura 3.12 – Prensa utilizada nos ensaios de compressão diametral 66
Figura 3.13 – Prensa utilizada nos ensaios de CBR 68
Figura 4.1 – Misturas feitas com emulsões RL-1C de uso convencional e RL-1C dosada) 73
Figura 4.2 – Curvas de compactação dos solos e das misturas de solo-emulsão com 0, 2, 4, 6 e 8% de emulsão (RL-1C Dosada 74

Figura 4.3 – Curvas de compactação dos solos in natura e das misturas de solo-emulsão com 0, 2, 4, 6 e 8% de emulsão (RL-1C Convencional) 74
Figura 4.4 – Variação da massa específica seca máxima com o teor de emulsão para as misturas de solo-emulsão 76
Figura 4.5 – Variação da umidade ótima com o teor de emulsão para as misturas de solo-emulsão 77
Figura 4.6a – Resistência à compressão simples das misturas solo-emulsão sem cura e com 24 horas de cura pré-compactação, para o solo argiloso *in natura* e com teores de 2, 4, 6 e 8% de emulsão em corpos-de-prova selados e não selados para a condição sem imersão pós-compactação 79
Figura 4.6b – Resistência à compressão simples das misturas solo-emulsão sem cura e com 24 horas de cura pré-compactação, para o solo argiloso *in natura* e com teores de 2, 4, 6 e 8% de emulsão em corpos-de-prova selados e não selados para a condição sem imersão e com imersão prévia em água pós-compactação 79
Figura 4.7 – Resistência à compressão simples das misturas solo-emulsão sem cura e com 24 horas de cura pré-compactação, para o solo arenoso *in natura* e com teores de 2, 4, 6 e 8% de emulsão em corpos-de-prova selados e não selados para a condição sem imersão e com imersão prévia em água pós-compactação 80
Figura 4.8 – Resistência à compressão simples para as misturas de solo-emulsão in natura e com teores de 2, 4, 6 e 8% de emulsão para o solo argiloso após 4 horas de imersão em água 82
Figura 4.9 – Resistência à compressão simples para as misturas de solo-emulsão in natura e com teores de 2, 4, 6 e 8% de emulsão para o solo arenoso após 4 horas de imersão em água 82
Figura 4.10 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios sem imersão em água 87
Figura 4.11 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios com imersão prévia em água 88
Figura 4.12 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo argiloso e a emulsão convencional para ensaios com imersão prévia em água 89
Figura 4.13 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo arenoso e a emulsão dosada para ensaios sem imersão em água 91
Figura 4.14 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão dosada

para o solo arenoso para ensaios com imersão prévia em água _____92
Figura 4.15 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão convencional para o solo arenoso para ensaios com imersão prévia em água _____93
Figura 4.16 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios sem imersão em água _____95
Figura 4.17 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios com imersão prévia em água _____96
Figura 4.18 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo argiloso e a emulsão convencional para ensaios com imersão prévia em água _____98
Figura 4.19 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios sem imersão em água _____99
Figura 4.20 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo argiloso e a emulsão convencional para ensaios com imersão prévia em água _____100
Figura 4.21 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo argiloso e a emulsão convencional para ensaios com imersão prévia em água _____102
Figura 4.22 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo arenoso e a emulsão dosada para ensaios sem imersão em água _____106
Figura 4.23 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo arenoso e a emulsão dosada para ensaios com imersão prévia em água _____107
Figura 4.24 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo arenoso e a emulsão convencional para ensaios com imersão prévia em água _____108
Figura 4.25 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo arenoso e a emulsão dosada para ensaios sem imersão em água _____109

Figura 4.26 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo arenoso e a emulsão dosada para ensaios com imersão prévia em água 110
Figura 4.27 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo arenoso e a emulsão convencional para ensaios com imersão prévia em água 111
Figura 4.28 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios sem imersão em água 112
Figura 4.29 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios com imersão prévia em água 113
Figura 4.30 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo argiloso e a emulsão convencional para ensaios com imersão prévia em água 115
Figura 4.31 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios sem imersão em água 116
Figura 4.32 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios com imersão prévia em água 117
Figura 4.33 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo argiloso e a emulsão convencional para ensaios com imersão prévia em água 118
Figura 4.34 – Estrutura do pavimento flexível considerada na análise do MR 124
Figura 4.35 – Variação do MR do solo argiloso com o teor de emulsão dosada para 28 dias de cura sem e após imersão 126
Figura 4.36 – Variação do MR do solo arenoso com o teor de emulsão dosada para 28 dias de cura sem e após imersão 127
Figura 4.37 – Variação do MR do solo argiloso com o teor de emulsão convencional para 28 dias de cura sem e após imersão 129
Figura 4.38 – Variação do MR do solo arenoso com o teor de emulsão convencional para 28 dias de cura sem e após imersão 130
Figura 4.39 – Variação de volume dos corpos-de-prova com o teor de emulsão depois do tempo de cura e após imersão 132
Figura 4.40 – Índice de suporte Califórnia em função do teor de emulsão para misturas de solos arenoso e argiloso 134
Figura 4.41 – Expansão em função do teor de emulsão para misturas de solo-emulsão para os solos arenoso e argiloso 135

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Classificações dos dois solos escolhidos 50
Tabela 3.2 – Resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos 50
Tabela 3.3 – Classificação dos solos estudados 52
Tabela 3.4 – Resultados das emulsões asfálticas utilizadas neste estudo 53
Tabela 3.5 – Seqüência de aplicação de tensões de carregamento e seu número de repetições – AASHTO T 397-99 64
Tabela 4.1 – Valores dos tempos de mistura em função do tipo e teor de emulsão 72
Tabela 4.2 – Valores de umidade ótima e massa específica seca máxima para o solo in natura e as misturas de solo-emulsão com 2, 4, 6 e 8% de emulsão dosada 76
Tabela 4.3 – Valores de umidade ótima e massa específica seca máxima para o solo in natura e as misturas de solo-emulsão com 2, 4, 6 e 8% de emulsão convencional 76
Tabela 4.4 – Condições de pré-compactação das misturas estudadas e condições de curas à que os corpo-de-prova foram submetidos 78
Tabela 4.5 – Condições de cura (pós-compactação) à que os corpo-de-prova foram submetidos 82
Tabela 4.6 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão (Emulsão dosada) 85
Tabela 4.7 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão (Emulsão convencional) 86
Tabela 4.8 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão (Emulsão dosada) 104
Tabela 4.9 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão (Emulsão convencional) 105
Tabela 4.10 – Parâmetros de regressão e coeficientes de determinação para as equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, para corpos-de-prova com emulsão dosada 121
Tabela 4.11 – Parâmetros de regressão e coeficientes de determinação para as equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, para corpos-de-prova com emulsão convencional 122
Tabela 4.12 – Modelo e valores do módulo de resiliência calculados para os modelos das misturas estudadas com emulsão dosada 125
Tabela 4.13 – Modelo e valores do módulo de resiliência calculados para os modelos das misturas estudadas com emulsão convencional 128
Tabela 4.14 – Valores de CBR e expansão para os solos arenoso e argiloso e, as misturas de solo-emulsão 134

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
AASHTO	American Association of State and Transportation Officials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	California Bearing Ratio (Índice de Suporte Califórnia)
c.p.	Corpo-de-prova
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
GC	Pedregulhos com Argilas e Areias
HRB	Highway Research Board
IP	Índice de Plasticidade
ISSMEF	Comitê de Solos Tropicais da Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações
Km	Quilômetro
kN	Quilo Newton
kPa	Quilo Pascal
LL	Limite de Liquidez
LA-1C	Lama Asfáltica Catiónica Tipo 1
LA-2C	Lama Asfáltica Catiónica Tipo 2
LA’	Solo de Comportamento Laterítico Arenoso
LE – STT	Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes
LG’	Solo de Comportamento Laterítico Argiloso
LVDT	Linear Variable Differential Transducers
MCT	Miniatura Compactado Tropical
MEV	Microscopia Eletrônica Por Varredura
min	Minuto
Mini-MCV	Ensaio MCV ou valor de MCV da metodologia MCV
mm	Milímetro
MR	Módulo de Resiliência
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira Registrada
NS’	Solo de Comportamento Não Laterítico Siltoso
NG’	Solo de Comportamento Não Laterítico Argiloso
NA’	Solo de Comportamento Não Laterítico Arenoso
PVC	Polyvinyl Chloride
RCS	Resistência à Compressão Simples
RCD	Resistência à Compressão Diametral
RR-1C	Emulsão Asfáltica de Ruptura Rápida Tipo 1

RR-2C,	Emulsão Asfáltica de Ruptura Rápida Tipo 2
RM-1C,	Emulsão Asfáltica de Ruptura Média Tipo 1
RM-2C,	Emulsão Asfáltica de Ruptura Média Tipo 2
RL-1C,	Emulsão Asfáltica de Ruptura Lenta Tipo 1
RL-2C,	Emulsão Asfáltica de Ruptura Lenta Tipo 2
RTR	Road Transport Research
SC	Areia Argilosa
SM	Areia Siltosa
SP	São Paulo
TRB	Transportation Research Record
USCS	Unified Soil Classification System
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

H	Altura do corpo de prova
F	Carga de ruptura
c’	Coeficiente de deformabilidade da classificação MCT
D	Diâmetro do corpo de prova
s	Desvio padrão
H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
R^2	Índice de determinação
e’	Índice de classificação MCT, calculado em função de PI e d’
ρ_{dmax}	Massa específica seca máxima
$\overline{Y}$	Média dos resultados
N	Número de repetições do ensaio
σ_3	Tensão de confinamento no ensaio Triaxial Cíclico
σ_d	Tensão de desvio no ensaio Triaxial Cíclico
A-4	Solo Siltoso (Classificação HRB)
A-7-6	Solo Argiloso (Classificação HRB)
σ_R	Resistência à tração
w_{ot}	Umidade ótima
θ	Primeiro invariante de tensão
τ_{oct}	Tensão cisalhante
P_a	Pressão atmosférica;
K_1, K_2, K_3	Parâmetros de regressão.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 18
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS 18
1.2 OBJETIVO 20
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 23
2.1 SOLOS TROPICAIS 23
2.1.1 Solos de comportamento laterítico 24
2.1.1.1 Fração arenosa 26
2.1.1.2 Fração argilosa 26
2.1.2 Solos de comportamento não laterítico 28
2.2 AS EMULSÕES ASFÁLTICAS 29
2.2.1 Os emulsificantes 29
2.2.2 Carga das partículas asfálticas 30
2.2.3 Velocidade de ruptura 30
2.3 O SOLO-EMULSÃO 32
2.3.1 Estabilização de solos com emulsões asfálticas 33
2.3.2 Estudos realizados com solo-emulsão 35
2.3.2.1 Resistência à compressão simples de solo-emulsão 35
2.3.2.2 Módulo de resiliência de solo emulsão 40
2.4 OBSERVAÇÃO FINAL 46
3. MATERIAIS E MÉTODOS 47
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS 47
3.1.1 Solos 47
3.1.1.1 Locais de coleta 47
3.1.1.2 Classificação dos solos 48
3.1.1.3 Características e classificação dos solos escolhidos 50
3.1.2 Emulsão asfáltica 52
3.1.2.1 Escolha da condição de cura e condição de ensaio 53
3.2 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS 55
3.3 ENSAIOS PARA DETERMINAR O COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS 55
3.3.1 Estudo preliminar 55
3.3.2 Estudo definitivo 56

3.3.2.1 Moldagem e cura dos corpo-de-prova 57
3.3.2.2 Ensaios triaxiais cíclicos 61
3.3.2.3 Ensaios de compressão simples 65
3.3.2.4 Ensaios de compressão diametral 66
3.3.2.5 Índice de Suporte Califôrnia 67
3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS 68
3.4.1 Método para aceitação dos corpos-de-prova 68

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 71

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 71

4.2 ENSAIOS PARA A ESCOLHA DA EMULSÃO 71

4.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO 73

4.3.1 Ensaios de compactação das misturas solo-emulsão 73
4.3.2 Ensaios à compressão simples 78
4.3.2.1Efeito da cura pre-compactação na resistência das misturas solo-emulsão 78
4.3.2.2 Efeito da condição de cura pós-compactação na resistência das misturas solo- emulsão 81

4.4 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES 84

4.4.1 Resistência à compressão simples das misturas solo-emulsão 84

4.4.1.1 Solo arenoso 86
4.4.1.1.1 Influencia do teor de emulsão 86
4.4.1.1.2 Efeito do tempo de cura 90
4.4.1.2 Solo argiloso 94
4.4.1.2.1 Influencia do teor de emulsão 94
4.4.1.2.2 Efeito do tempo de cura 99

4.5 ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL 103
4.5.1 Resistência à tração por compressão diametral das misturas solo-emulsão 103

4.5.1.1 Solo arenoso 105
4.5.1.1.1 Influencia do teor de emulsão 105
4.5.1.1.2 Efeito do tempo de cura 109
4.5.1.2 Solo argiloso 112
4.5.1.2.1 Influencia do teor de emulsão 112
4.5.1.2.2 Efeito do tempo de cura 116

4.6 ESAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS 119

4.6.1 Módulo de resiliência das misturas solo-emulsão 119

4.6.1.1Modelagem do módulo de resiliência em função do estado de tensão 120
4.6.1.2 Módulo de resiliência para uma estructura de baixo volume de tráfego 124
4.6.2 Ensaios Complementares 131
4.6.2.1 Variação volumétrica 131
4.6.2.2 Índice de suporte Califôrnia 133

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 137

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 137
5.2 CONCLUSÕES 137
5.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 140
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 141
- ANEXO

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A construção e a manutenção de rodovias demanda o emprego de uma grande quantidade de materiais geotécnicos. Assim, é necessário que se analise o par disponibilidade *versus* qualidade dos solos utilizados e caso, os materiais naturais não sejam adequados para o uso em pavimentação é indicado melhorar as suas propriedades, tais como a resistência, expansibilidade, permeabilidade, estabilidade, etc., através da adição de outros solos ou agentes preparados com esta finalidade.

No Brasil, existem regiões que apresentam dificuldade na localização de jazidas que forneçam solos que se adaptem às especificações técnicas para a execução de camadas de base e sub-base de rodovias. Muitas vezes, estas jazidas localizam-se a grandes distâncias, sendo nesses casos o mais indicado analisar a possibilidade do uso de materiais alternativos ou solos estabilizados.

Para obter a melhoria destes materiais é utilizado o processo de estabilização de solos, que proporciona aos solos características mecânicas com as quais este é capaz de resistir aos agentes erosivos da natureza como também às solicitações e aos esforços produzidos pela ação do tráfego rodoviário, sendo que este processo pode ser feito pela adição de outros solos ou pela adição de aglutinantes.

A estabilização de solos com emulsões asfálticas (solo-emulsão) é um exemplo do uso de aglutinantes. O solo-emulsão é uma mistura de solo, emulsão asfáltica e água, sendo utilizada quando não se dispõe de materiais naturais adequados. Segundo ABEDA (2001), a estabilização solo-emulsão é uma alternativa técnica de baixo custo para a preservação do meio ambiente e dos recursos naturais, uma vez que há o aproveitamento dos materiais locais para a execução à frio de sub-base e base de resistência estrutural adequada ao volume de tráfego e as condições do subleito em função da espessura resultante dos pavimentos flexíveis e rígidos.

Além do emprego como sub-bases e bases de pavimento, destacam-se ainda, como aplicação do solo-emulsão, proteção superficial de taludes, revestimentos de áreas de estacionamento, tratamento antipó, impermeabilização de barragens etc.

A metodologia de dosagem de solo-emulsão baseia-se no método desenvolvido para solos de clima temperado, cujas condições climáticas que influenciam nos processos de sua formação, diferem daquelas a que são submetidos os solos de regiões tropicais. De modo geral, pode-se presumir que solos de mesma classificação geotécnica, considerando-se as classificações tradicionais, mas originados através de diferentes processos de formação, quando estabilizados com a mesma quantidade de estabilizante, poderiam resultar em misturas com propriedades e comportamento diversos.

No projeto de pavimentos onde serão utilizados materiais estabilizados com emulsões asfálticas, na maioria das vezes, recorre-se a métodos de dimensionamento empíricos, baseados em conhecimentos adquiridos através de observações ao longo de anos. Entretanto, é sabido que o dimensionamento através de métodos racionais é mais completo, visto que possibilita uma análise da compatibilidade das tensões e deformações a que estão submetidos os pavimentos.

No Brasil, ainda são poucas as pesquisas no que diz respeito à caracterização, em laboratório, de materiais estabilizados com emulsões asfálticas visando o emprego de métodos racionais de dimensionamento. Destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Jacintho (2005), Miceli (2006) e Soliz (2007) onde se verificou, entre outros fatores, a influência do tempo de cura, na resistência, características resilientes, fadiga, de misturas de solo-emulsão

1.2 OBJETIVO

O objetivo principal desde trabalho é avaliar o comportamento mecânico de misturas de solos estabilizadas pela adição de emulsão asfáltica.

As misturas serão submetidas a ensaios de compressão simples, compressão diametral e triaxiais cíclicos, para obtenção das resistências à compressão simples, à tração indireta e módulo de resiliência, respectivamente. Será analisada a influência da granulometria dos solos, a

porcentagem de emulsão asfáltica, tempo e condição de cura nestes parâmetros.

Na composição das misturas de solo-emulsão, serão utilizados dois diferentes solos, um arenoso e outro argiloso, sendo ambos de comportamento laterítico, segundo classificações MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi desenvolvido como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Transportes, estando dividido em 5 capítulos.

O capítulo 1 apresenta considerações que procuram justificar a importância do objetivo da pesquisa.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica. Procurou-se abordar principalmente aspectos relacionados ao assunto que poderiam auxiliar no melhor entendimento dos problemas envolvidos na pesquisa, ou seja, a avaliação do comportamento, em laboratório, das misturas solo-emulsão em função de parâmetros como: teor de emulsão utilizado nas misturas, tempo de cura, condição de cura, energia de compactação, etc.

O capítulo 3 discorre sobre a caracterização dos materiais a serem utilizados na pesquisa, os procedimentos usados nos ensaios laboratoriais das misturas e o processo de análise dos resultados obtidos.

O capítulo 4 apresenta os resultados da investigação experimental. São analisados os resultados dos ensaios de compactação, compressão simples e diametral e triaxiais cíclicos, com destaque para a influência do tempo de cura, condição de cura e teor de emulsão na resistência e deformabilidade das misturas. No caso das misturas do solo-emulsão é também analisada a influência do tipo de solo utilizado na composição da mistura.

Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões obtidas na pesquisa e sugestões para futuros trabalhos sobre o tema.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi realizada com o objetivo de auxiliar o estudo do comportamento mecânico dos solos tropicais quando misturados com emulsão asfáltica, compondo misturas de solo-emulsão.

Este capítulo foi dividido em três itens principais. O primeiro apresenta algumas características relativas ao comportamento dos solos tropicais, como: origem; cor; mineralogia etc. O segundo explana sobre as emulsões asfálticas e o seu uso na pavimentação rodoviária. Finalmente, o terceiro discorre sobre pesquisas científicas realizadas no Brasil e no mundo, com destaque para os trabalhos nacionais, com foco na resistência à compressão simples e módulo de resiliência de misturas solo-emulsão.

2.1 SOLOS TROPICAIS

No Brasil, ao se introduzir os conceitos da mecânica dos solos para solução de problemas ligados à construção rodoviária, ocorreram várias discrepâncias entre as previsões efetuadas por esta especialidade e o real comportamento dos solos nas obras. Como esses conceitos são baseados em metodologia desenvolvida em regiões não tropicais, as discrepâncias têm sido atribuídas, em grande parte, às peculiaridades dos solos brasileiros como: ocorrência; constituição; formação; propriedades índices e condições ambientais (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

O fato de que o Brasil é um país de clima tropical úmido, apresenta grandes faixas de solos tropicais cuja formação provém da ação de processos geológicos e/ou pedológicos ocorridos nessas regiões. Estes solos possuem variações mineralógicas muito maiores que nos solos de outras regiões. No entanto, segundo Nogami & Villibor (1995), o solo não pode ser considerado como tropical apenas por se encontrar em regiões de clima tropical úmido, mas deve apresentar aspectos geotécnicos que o caracterize como solo tropical ou não. Dentre os solos tropicais destacam-se duas classes principais: solos de comportamento laterítico e não laterítico.

2.1.1 Solos de comportamento laterítico

Segundo Nogami (1995), solo laterítico é definido pelo Comitê de Solos Tropicais da Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (ISSMEF) como aquele que pertence aos horizontes A (camada mineral com enriquecimento de matéria orgânica) e B (apresenta máxima expressão de cor, estrutura e/ou que possuem materiais translocados), de perfis bem drenados, desenvolvidos sob atuação de clima tropical úmido. Possuem sua fração argila constituída essencialmente de argilominerais do grupo das caulinitas e de óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio o que confere a estrutura poros e agregações altamente estáveis. Estes solos têm tendência a possuírem uma grande parcela da sua granulometria menor que 2 mm de diâmetro e em alguns locais podem apresentar, inseridos na sua constituição, pedregulhos lateríticos denominados de laterita, que são massas

consolidadas, maciças ou porosas, de mesma mineralogia dos solos lateríticos e que tem sido muito aproveitadas como materiais de construção rodoviária.

Segundo Nogami & Villibor (1983), um solo pode ter comportamento laterítico sem pertencer a um perfil pedológico laterítico e eventualmente, pode pertencer a um perfil pedológico laterítico e não ter comportamento geotécnico laterítico.

Em geral, as normas tradicionais limitam superiormente o Limite de Liquidez (LL) em 25% e Índice de Plasticidade (IP) em 6%, com a finalidade de controlar a variação de volume dos solos compactados, conseqüentemente da variação do teor de umidade por secagem ou imersão em água. Entretanto, a experiência tem mostrado que tais limites não se aplicam aos solos tropicais. Existem vários exemplos de solos tropicais com elevados LL e que se expandem muito pouco quando compactados e imersos em água, o que contraria as normas tradicionais. Por outro lado, existem exemplos de solos que sofrem elevada expansão, apesar de apresentarem LL e IP de acordo com os limites impostos, significando que tais limites não são adequados para previsão do comportamento expansivo dos solos tropicais.

A elevada porosidade aparente natural, a baixa resistência e a baixa capacidade de suporte são características desses solos. Entretanto, quando corretamente compactados adquirem elevadas resistências, grande capacidade de suporte, baixa permeabilidade, além da pequena perda da

capacidade de suporte quando imerso em água (NOGAMI & VILLIBOR, 1995). A maioria desses solos apresenta, em seu estado natural, baixa plasticidade, coeficientes de permeabilidade e ângulos de atrito elevados.

2.1.1.1 Fração arenosa

O quartzo é o mineral presente com maior freqüência na fração areia. Apesar de ser encontrado também em solos não tropicais, existem peculiaridades que permitem identificar seu caráter laterítico. Uma dessas peculiaridades é a presença de película de óxidos, que lhe dá uma tonalidade avermelhada, rósea, arroxeada ou amarelada. Além do quartzo há presença de minerais como magnetita, turmalina e zircão, materiais mecanicamente resistentes e quimicamente estáveis.

O excelente desempenho apresentado por trechos experimentais de pavimentos constituídos de solo arenoso fino laterítico como base comprovou, no final da década de 1960 e inicio da década de 1970, as limitações dos critérios tradicionais para escolha de solos, quando aplicados a solos tropicais (VILLIBOR, 1981). As metodologias tradicionais consideravam os solos arenosos finos lateríticos inadequados para a construção de pavimentos, o que contraria os resultados obtidos com os trechos experimentais. Tornou-se evidente a necessidade do uso de novos critérios de escolha que pudessem ser aplicados aos solos tropicais, devendo estes estarem relacionados com as propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos compactados.

2.1.1.2 Fração argilosa

A fração argilosa caracteriza-se pela constituição de argilominerais do grupo da caulinita e por ter uma elevada porcentagem de óxidos de Fe (ferro) e de Al (alumínio). A presença dos óxidos de Fe e Al resultam numa microestrutura esponjosa ou de pipoca possuindo também substâncias cimentantes responsáveis pelo bom desempenho mecânico.

As argilas lateríticas quando comparadas com as argilas de climas frios e temperados, apresentam menos problemas na construção rodoviária, isto porque são menos expansivas e menos susceptíveis a perder resistência em contato com a água. Além disso, em clima tropical úmido, a elevada pluviosidade, a evotranspiração também desempenha um papel importante. Em muitos ambientes tropicais, o teor de umidade da base não aumenta além do ótimo da compactação. Outra peculiaridade prende-se ao fato de que o uso de energias elevadas de compactação não ocasiona problemas, no que se refere à possível expansão, quando a argila é posta em contato com água livre (NOGAMI & VILLIBOR, 1983).

Todos estes fatores contribuem para o uso das argilas lateríticas na pavimentação rodoviária, somando o fato de que muitos trechos experimentais já foram executados desde a década de 1950 apresentando bons comportamentos quando usados com tráfego leve, isto acompanhado do aspecto econômico que implica o uso de bases de argila laterítica com desempenho similar ao das bases de solo-brita, com a diferença que estas

últimas são capazes de suportar um tráfego mais pesado e tem um custo econômico mais elevado.

2.1.2 Solos de comportamento não laterítico

Segundo Nogami & Villibor (1995) os solos de comportamento não laterítico constituem, em condições naturais, as camadas subjacentes às lateríticas, com espessuras que podem atingir dezenas de metros. Sua aparência macroscópica é, em geral, caracterizada pela presença de camadas, xistosidades e vazios, que em grande parte foram herdadas da rocha matriz. Sua composição mineralógica é muita variada podendo constatar-se a presença de mica, acarretando efeitos como elevação no limite de liquidez, elevação da expansibilidade por aumento de umidade, diminuição da massa específica aparente seca máxima quando compactado, elevação da umidade ótima de compactação, diminuição da capacidade de suporte e redução no módulo de resiliência.

Estes solos possuem grandes quantidades de silte, mas que se apresentam diferentemente dos siltes típicos dos solos das regiões de clima temperado (constituídos de partículas inertes). Contêm macrocristais de caulinita e mica, apresentando plasticidade mesmo sem possuir partículas de argila, entretanto, muitos solos de comportamento não laterítico podem possuir o quartzo como material predominante. Há também a possibilidade destes solos possuírem grãos intemperizados com diferentes graus de intemperização (VIANA, 2007).

2.2 AS EMULSÕES ASFÁLTICAS

As emulsões asfálticas são dispersões coloidais de uma fase asfáltica em uma fase aquosa (direta), ou então, uma fase aquosa dispersa em uma fase asfáltica (inversa), com ajuda de um agente emulsificante. É obtida combinando o asfalto aquecido com água, em um meio agitado, denominado moinho coloidal, na presença dos emulsificantes, que têm o objetivo de dar certa estabilidade ao conjunto, de favorecer a dispersão e de revestir os glóbulos de betume de uma película protetora, mantendo-os em suspensão (ABEDA, 2001).

2.2.1 Os emulsificantes

Os emulsificantes são usados em pequenas quantidades, de 0,5 a 1,5% em peso, sobre a emulsão. De acordo com suas propriedades químicas e estrutura molecular, obtém-se emulsões com características físico-químicas particulares, pois o emulsificante age nos seguintes fatores:

- produz uma redução da tensão superficial entre o asfalto e a água;
- estabiliza a emulsão fixando-se na periferia dos glóbulos dispersos de asfalto, impedindo assim a sua aglomeração (coalescência), o que provocaria a ruptura da emulsão;

2.2.2 Carga das partículas asfálticas

As partículas aniônicas são sabões em que um ânion orgânico está associado a um álcali, como é o caso do estearato de sódio, que quando

dissolvido em água se dissocia em ânion estearato, com carga elétrica negativa e cátion sódio, com carga elétrica positiva. O estearato é solúvel no ligante, conferindo aos glóbulos do cimento asfáltico de petróleo (CAP) na emulsão uma carga elétrica negativa, o que os mantém separados. As emulsões assim preparadas têm boa adesividade aos agregados do tipo eletropositivo, ou seja, rochas de natureza calcária.

As partículas catiônicas consistem geralmente em sais de amina. Quando se dá a dissociação eletrolítica é o cátion que é solúvel no ligante, conferindo aos glóbulos da emulsão uma carga elétrica positiva. As emulsões assim preparadas apresentam boa adesividade aos agregados cujas cargas elétricas superficiais são negativas, tais como os arenitos e granitos (possuem elevada percentagem de sílica).

2.2.3 Velocidade de ruptura

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

Devido ás características dos agregados brasileiros, as emulsões catiônicas são as correntemente empregadas na pavimentação rodoviária. A

principal característica desta emulsão é o fato de o seu rompimento se dar através da reação de neutralização das cargas negativas dos agregados de natureza ácida, normalmente empregados na construção rodoviária. Nas emulsões aniônicas a ruptura se dá primeiro por evaporação da água (PETROBRAS, 1996).

Toda emulsão deve ter um mínimo de resistência à ruptura, para permitir o seu transporte e armazenagem, o que é conseguido com o uso de agentes emulsificantes.

De acordo com a velocidade de ruptura, as emulsões podem ser assim classificadas (IBP, 1999):

- Ruptura Rápida (RR): tem uma percentagem relativamente baixa de emulsificante e é menos estável. A água e o ligante se separam logo após aplicação sobre o agregado. É indicada para tratamentos superficiais, pinturas de ligação, imprimação e macadames betuminosos.
- Ruptura Média (RM): são utilizadas principalmente para misturas com agregados limpos e sem pó, na confecção de pré-misturados a frio.
- Ruptura Lenta (RL): utilizadas em estabilizações de solos e no preparo de lamas asfálticas.

Existem também emulsões especiais que são fabricadas sem carga elétrica (não iônica) e, também, emulsões para lamas asfálticas (LA) e agentes rejuvenescedores emulsionados.

De acordo com a quantidade de CAP (cimento asfáltico de petróleo) utilizado na fabricação da emulsão, elas podem se classificar como 1C e 2C, em que “C” indica emulsão tipo catiônica e “1 e 2” estão associados à viscosidade da emulsão que por sua vez está relacionada à quantidade de CAP. Assim pode-se resumir a classificação das emulsões asfálticas nos seguintes tipos: RR-1C, RR-2C, RM-1C, RM-2C, RL-1C, RL-2C, LA-1C e LA-2C, emulsões polimerizadas (ABEDA, 2001).

2.3 O SOLO-EMULSÃO

O solo-emulsão é um processo de estabilização pelo qual as propriedades do solo são melhoradas por meio da incorporação de emulsão, proporcionando a este as características mecânicas a serem cumpridas para o fim ao qual se destina. A técnica de estabilização mediante o solo-emulsão é aplicada na construção de barragens, estradas e aeroportos, pois neste tipo de construções se vêem envolvidas vastas áreas onde o aproveitamento do solo local é importante para a redução das distâncias de transporte. Em geral este tipo de estabilização busca a melhora das propriedades mecânicas e físico-químicas dos solos, nas construções onde estas forem necessárias.

2.3.1 Estabilização de solos com emulsões asfálticas

A estabilização de solos com emulsões asfálticas foi usada pela primeira vez por Mckesson em 1930, nos Estados Unidos (HIGHWAY RESEARCH BOARD, 1935). Devido às pesquisas envolvendo base e sub-base de solo-emulsão para construção de aeroportos e rodovias devido a 2ª Guerra Mundial, os Estados Unidos tornaram-se precursores nesta área de conhecimento.

No Brasil, nos atuais projetos de pavimentos, não se tem dado destaque a sub-bases de solo-emulsão. Em alguns estados como Paraíba, Maranhão, Piauí, São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais existem pesquisas e trechos de experimentais com camadas de até 5 cm de espessura.

A primeira experiência de campo, no Estado de São Paulo, utilizando-se base de solo-emulsão, foi realizada na década de 1960, em conseqüência da ausência de solos que possuíssem índice de suporte aceitável. Outro agravante foram as poucas pedreiras existentes na região que na ocasião, atendiam à demanda das estradas de ferro.

O solo-emulsão vem sendo usado principalmente na construção de bases e sub-bases de pavimentos. Seu uso proporciona o aumento nos valores de resistências das bases e sub-bases e a diminuição das

deformações nestes produzidas, quando comparadas às bases e sub-bases não estabilizadas sobre o mesmo carregamento.

Segundo Inglês & Metcalf (1972), a principal função do material asfáltico é conferir coesão e impermeabilização aos solos. O aumento da coesão é notado principalmente em solos arenosos, enquanto o efeito da impermeabilização é fortemente observado em solos coesivos. Para estes a argila seria o elemento coesivo e o asfalto teria a função de proteger as partículas de argila do efeito da umidade, contribuindo para o aumento da resistência dos mesmos. Ambos os efeitos originam-se, em parte, da formação de filmes ao redor das partículas de solo, que as aderem e previnem a absorção de água, e do simples bloqueio dos poros, impedindo a entrada da água na massa de solo.

Segundo Kezdi (1979), a interação entre o asfalto e as partículas granulares do solo difere do que ocorre entre o asfalto e as partículas finas. Nos solos granulares o efeito do asfalto é similar ao que ocorre no concreto betuminoso com a diferença que no solo o asfalto não preenche os vazios do agregado, dando coesão apenas aos pontos de contato das partículas como mostra Figura 2.1.

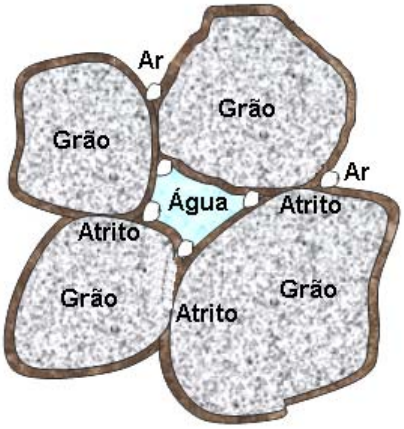


Figura 2.1 – Ação da emulsão asfáltica nas partículas de solo (Fonte: KEZDI, 1979).

2.3.2 Estudos realizados com solo-emulsão

2.3.2.1 Resistência à compressão simples de solo-emulsão

Ferreira (1980) avaliou a resistência à compressão simples de misturas de solo-emulsão moldadas em condições ótimas de compactação. Foi comparado o desempenho das misturas usando três solos diferentes. Foram usados teores de emulsão de 3%, 5%, 7% e 10%, e 24 horas de tempo de cura na estufa à 60°C e um período de imersão de uma hora.

Após a cura as amostras foram extraídas da estufa, e deixadas ao ar livre durante duas horas, este processo teve a finalidade de eliminar a água existente na interface asfalto-agregado. Ao final da cura os corpos de prova foram imersos em água por uma hora antes do ensaio de compressão simples.

Carvalho (1992) avaliou o comportamento mecânico, através do ensaio de compressão simples, de misturas de solo-emulsão compostas com um solo arenoso e outro coesivo. Para a mistura em questão, foi utilizado como

aglomerante a emulsão asfáltica RL-1C. Os teores utilizados foram de 0, 2, 3, 4, 5, 6 e 7% de emulsão em relação ao peso do solo seco. Os corpos de prova foram compactados para cada teor de emulsão a fim de obter o peso específico máximo e a umidade ótima.

Após a moldagem, os corpos de prova foram ensaiados para duas condições, sendo a primeira logo após a compactação e a outra logo após um processo de cura na estufa que na ocasião, mantinha uma temperatura de 40º C. Após o período de cura, os corpos de prova foram condicionados à imersão em água por 3 horas antes do ensaio. Posteriormente, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão simples sob o carregamento com velocidade de 1 mm/min. A resistência à compressão simples no solo arenoso foi comparada a partir da resistência obtida do solo puro, apresentando um incremento de 72% para o solo com 4% de emulsão asfáltica. Verificou-se também o incremento da resistência para o teor de 4% depois do tempo de cura, sendo esse incremento de 905%, para esse mesmo teor teve uma queda da resistência de 1085% logo após o processo de imersão durante 4 horas.

Jacintho (2005) avaliou a resistência à compressão simples de misturas de solo-emulsão compostas com solos classificados como SC (areias argilosas), SM (areias siltosas) e GC (pedregulhos com argilas e areias) segundo classificação unificada (USCS). A velocidade de carregamento utilizada para o ensaio de compressão simples foi de 1,00mm/min. Os teores de emulsão asfáltica utilizados foram de 0, 2, 4, 6 e 8% sendo utilizados períodos de

aeração das misturas de 0, 2, 3 e 4 horas. A Figura 2.2 apresenta o crescimento dos valores de resistência à compressão simples em função do teor de emulsão e tipo de solo utilizado na mistura.

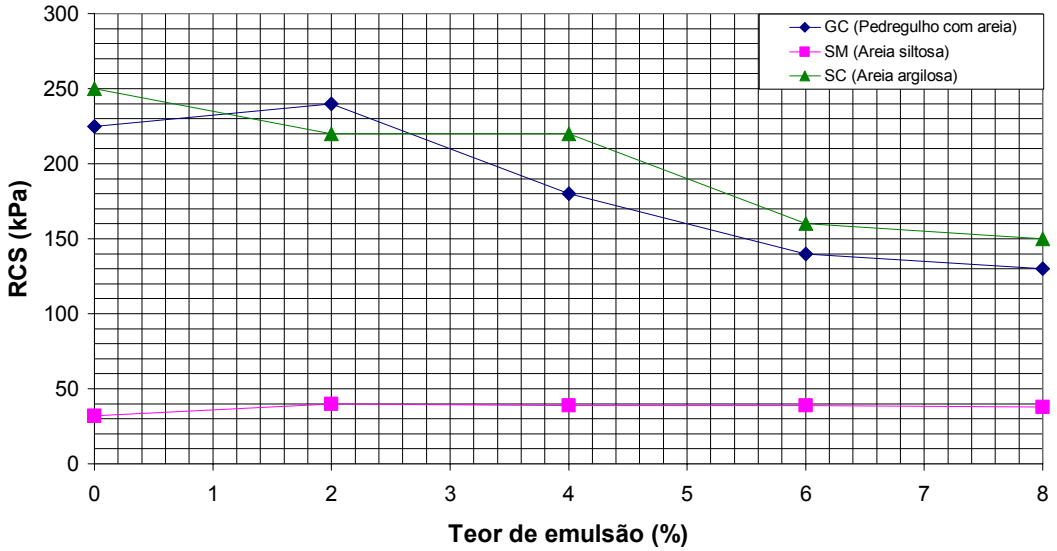


Figura 2.2 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão para um tempo de aeração da mistura de 4 horas (JACINTHO, 2005).

De acordo com os resultados apresentados, o acréscimo na quantidade de emulsão resultou no aumento de resistência à compressão simples só para o teor de 2% nas misturas com os solos GC e SM. Nas misturas compostas com solo SM, observa-se que a RCS se mantém praticamente constante para teores acima de 2%, para as misturas com o solo GC, observa-se que depois do incremento da RCS com a adição de 2% de emulsão se produz um decrescimento desta com a adição de maiores teores de emulsão, finalmente para o solo SC observou-se um decrescimento da resistência à compressão simples (RCS) para todas as misturas onde foi adicionada a emulsão.

Miceli (2006) avaliou a resistência à compressão simples de mistura de solo-emulsão. Para as misturas em questão foram utilizados três solos classificados como A-2-4, A-7-5 e A-7-6 segundo a classificação HRB e SM para os três solos segundo a classificação unificada. Os corpos de prova foram moldados próximos da umidade ótima (w_{ot}) e da densidade máxima (ρ_{dmax}) e submetidos a um tempo de cura 28 dias expostos ao ar livre. Foram utilizados teores de emulsão de 2, 4, 6 e 8% e o solo *in natura*. A Figura 2.3 apresenta a variação de resistência à compressão simples em função do teor de emulsão.

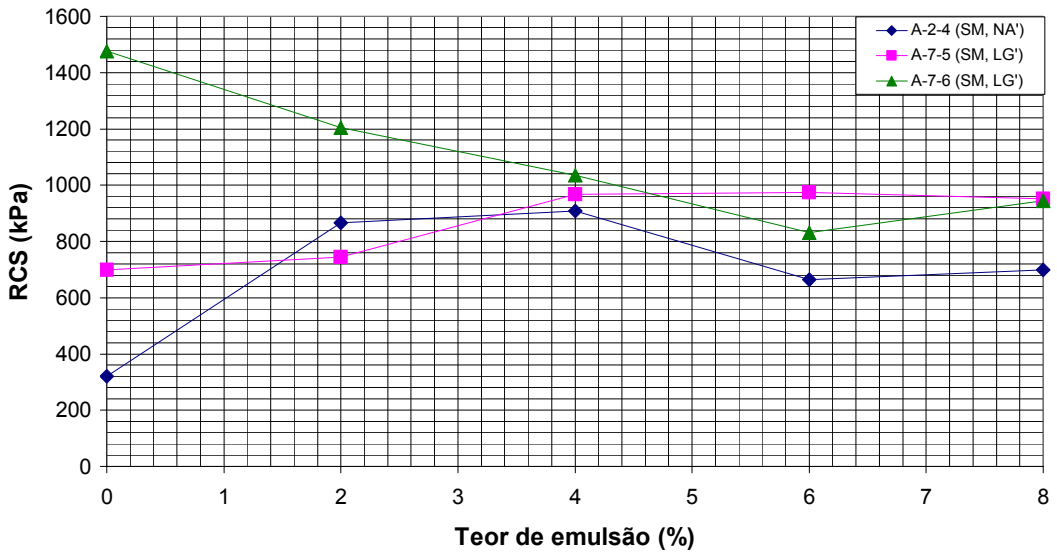


Figura 2.3 – Variação de resistência à compressão simples em função do teor de emulsão para o período de cura de 28 dias exposta ao ar livre (MICELI, 2006).

Neste estudo, quando são adicionados 2% e 4% de emulsão aos solos A-2-4 e A-7-5 acontece um ganho de resistência em ambos os solos, entretanto ao se adicionar maiores teores de emulsão no primeiro solo (A-2-4) acontece um decrescimento da resistência. Para o segundo solo (A-7-5) a resistência tende a se manter constante com a adição de maiores teores de emulsão, finalmente para o solo A-7-6 a adição de emulsão produz perda de resistência para todos os teores adicionados. Assim, o aumento de resistência

com o aumento do teor de emulsão é efetivo nos solos A-2-4 e A-7-5, já o solo A-7-6 a adição de emulsão produz um decrescimento na resistência.

Soliz (2007) avaliou a resistência à compressão simples de misturas de solo-emulsão utilizando, na composição das misturas, três solos classificados como A-1-b, A-7-5 e A-2-4 (segundo a classificação HRB) e NA', NG' e NS' (segundo classificação MCT), os teores de emulsão utilizados na pesquisa foram 1%, 2%, 3% e solo *in natura*, para solos A-1-b e A-2-4, para solo A-7-5 foram usados solo *in natura* e teores de emulsão 4%, 6% e 8%. Os corpos de prova tinham dimensões do cilindro de Proctor Normal. As amostras foram curadas por 7 dias ao ar. A velocidade de carregamento utilizada no ensaio de compressão simples foi de 0,65 mm/min.

A Figura 2.4 mostra a variação da resistência à compressão simples em função do teor de emulsão.

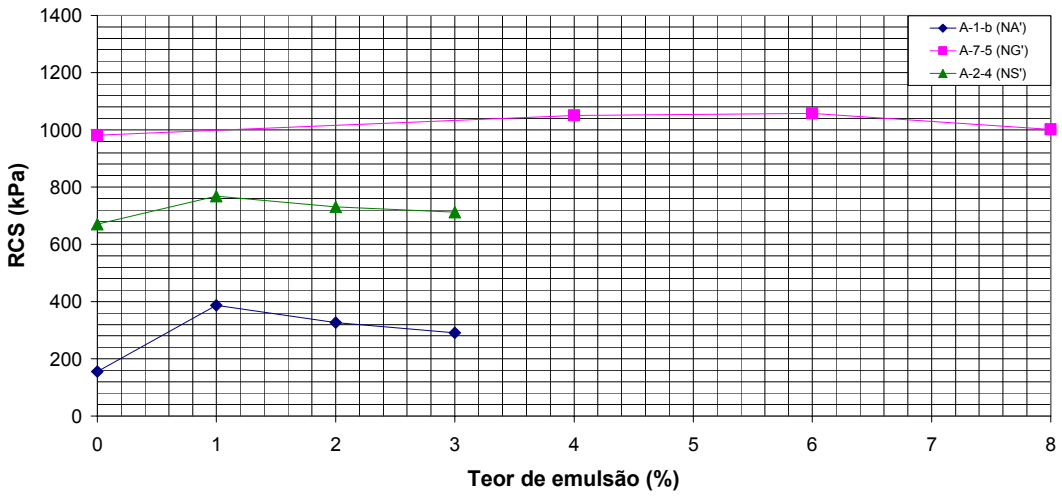


Figura 2. 4 – Variação da resistência à compressão simples em função do teor de emulsão (SOLIZ, 2007).

Analisando-se a Figura 2.4 e a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, observa-se que o aumento do teor de emulsão produz ganho de resistência para misturas constituídas com os solos A-1-b, A-2-4 e A-7-5.

No primeiro acréscimo de emulsão para os solos A-1-b, A-2-4 e A-7-5, o ganho de resistência é da ordem de 148%, 15% e 7%, respectivamente, quando comparadas com a resistência do solo *in natura*. A adição de maiores teores de emulsão aos solos leva à diminuição do ganho de resistência, considerando-se ainda as mesmas misturas. Assim, o ganho de resistência é mais efetivo para as misturas constituídas com 1% de emulsão para os solos A-1-b e A-2-4 e 4% para o solo A-7-5.

Em todas as misturas envolvidas, o maior ganho de resistência se produz para os menores teores de emulsão que foram adicionados a cada uma das misturas estudadas.

2.3.2.2 Módulo de resiliência de solo-emulsão

Miceli (2006) avaliou o módulo de resiliência de misturas de emulsão com três tipos de solos classificados como A-2-4, A-7-5 e A-7-6 pela HRB. Nesse estudo foi determinada a influência, no módulo de resiliência, da variação de fatores como tensão desvio, teor de umidade na compactação, teor de emulsão, período de cura e tipo de solo. Os teores de emulsão

utilizados na mistura para os três solos foram de 2, 4, 6 e 8% e a compactação foi realizada com energia normal. Os corpos de prova foram curados por 7 e 28 dias. As Figuras 2.5, 2.6 e 2.7 mostram o efeito do tempo de cura e da porcentagem de emulsão nos valores dos módulos de resiliência das misturas com solos A-2-4, A-7-5 e A-7-6, respectivamente.

De acordo com os resultados, os pesquisadores constataram que o valor do módulo de resiliência cresce com adição de teores de emulsão aplicados. A mistura com solo A-2-4 submetida ao período de cura de 28 dias produziu maiores valores de módulo de resiliência que com o solo ensaiado após a compactação e após 7 dias de cura. O período de cura mais extenso resultou em valores de MR maiores para todas as misturas com os três solos estudados.

As Figuras 2.5 e 2.6 apresentam as variações do valor do módulo de resiliência em função do teor de emulsão para o solo A-2-4 e A-7-5.

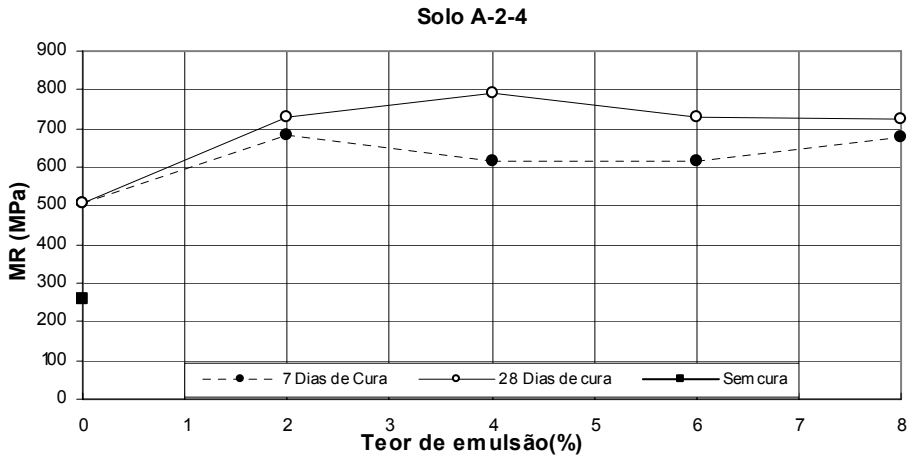


Figura 2.5 - Módulo de resiliência, das misturas com o solo A-2-4, em função do tempo de cura e teor de emulsão (MICELI, 2006).

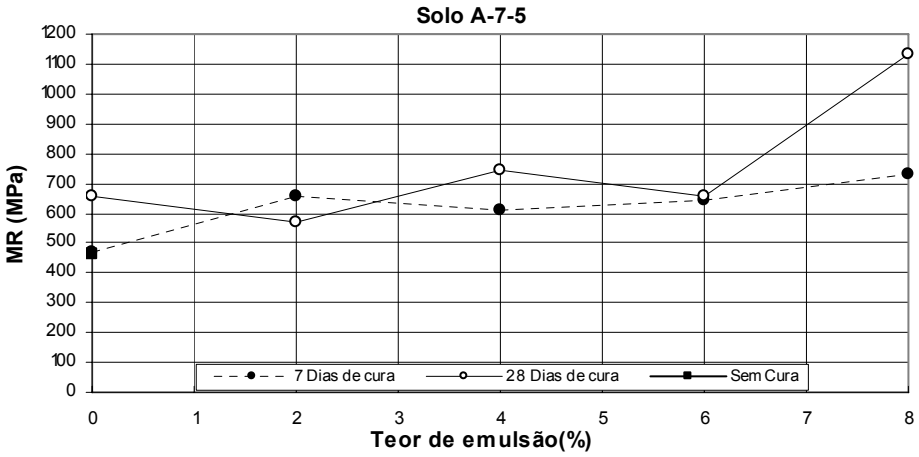


Figura 2.6 - Módulo de resiliência, das misturas com solo A-7-5, em função do tempo de cura e teor de emulsão (MICELI, 2006).

O solo A-7-5, de alta plasticidade, apresenta crescimento e decrescimento nos valores do módulo de resiliência em relação ao teor de emulsão, para a condição após 7 dias de cura. Para a condição de ensaio logo após a compactação, o teor de 2% de emulsão no solo apresenta um crescimento do valor do módulo de resiliência, mostrando uma leve variação para os teores de 4 e 6% e crescendo consideravelmente para o teor de 8%. Para a condição após 7 dias de cura o valor do módulo de resiliência apresenta um decrescimento para o teor de 2% de emulsão e um crescimento destes valores com a adição de teores maiores de emulsão asfáltica.

A Figura 2.7 mostra, considerando os ensaios logo após a compactação e para um tempo de cura de 7 dias, respectivamente, a variação do módulo de resiliência em função do teor de emulsão para o solo A-7-6.

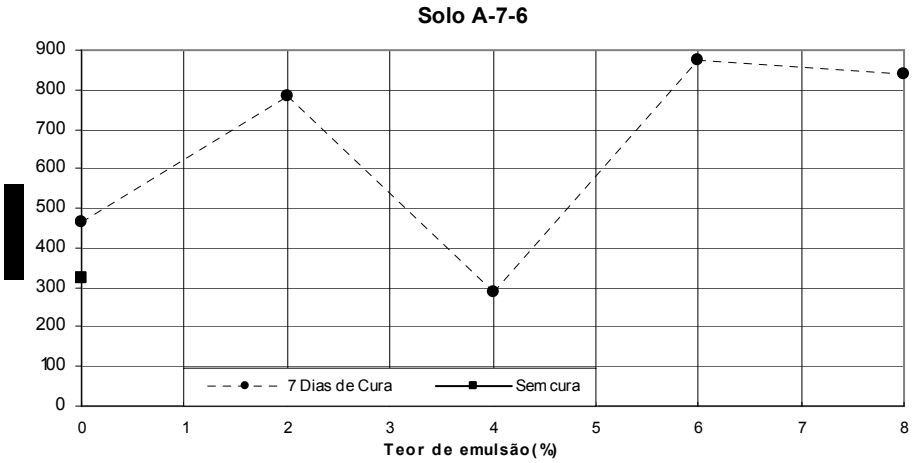


Figura 2.7 – Módulo de resiliência, das misturas com solo A-7-6, em função do tempo de cura e teor de emulsão (MICELI, 2006).

Os resultados dos ensaios realizados com o solo A-7-6 mostram que a adição de emulsão produz um incremento do módulo de resiliência para os teores de 2, 6 e 8%, o que não acontece com o teor de 4% que apresenta um decrescimento significativo para este teor. Um incremento dos valores de módulo de resiliência com o aumento do tempo de cura, pode ser percebido.

Soliz (2007) realizou estudos para determinação do módulo de resiliência de misturas de solo-emulsão utilizando três tipos de solos cujas classificações são A-1-b, A-7-5 e A-2-4 segundo a HRB.

Além do solo puro, as porcentagens de emulsão utilizadas em cada mistura foram de 1, 2, 3 e 4% para os solos A-1-b e A-2-4, para o solo A-7-5 foram usados porcentagens de 4%, 6% e 8% em relação ao peso do solo seco. Para cada porcentagem foram moldados corpos de prova com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

A compactação foi realizada de maneira a se obter a densidade seca máxima conforme critério da AASHTO T-99. Os corpos de prova foram ensaiados numa primeira etapa logo após a compactação e numa segunda etapa depois de um tempo de cura de 7 dias, expostos ao ar livre.

A Figura 2.8 apresenta a variação do valor do módulo de resiliência em função do teor de emulsão para o solo A-1-b.

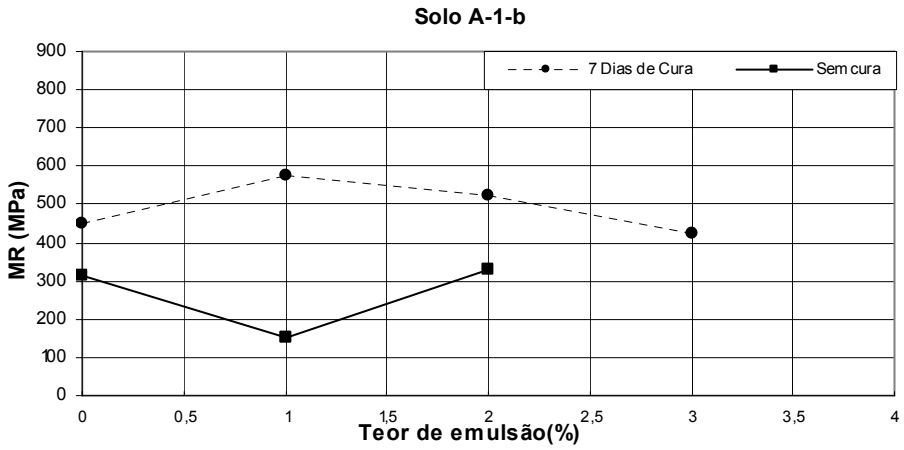


Figura 2.8 – Módulo de resiliência, das misturas com solo A-1-b, em função do tempo de cura e teor de emulsão (SOLIZ, 2007)

De acordo com os resultados mostrados na Figura 2.8, o módulo de resiliência das misturas com o solo A-1-b, decresce quando há adição de 1% de emulsão e tem um leve incremento para o teor 2%, quando ensaiadas logo após a compactação. Para a condição de 7 dias de cura, observa-se um incremento do módulo de resiliência com a adição de emulsão atingindo o valor máximo para o teor de 1%.

A Figura 2.9 apresenta a variação do valor do módulo de resiliência em função do teor de emulsão para o solo A-7-5.

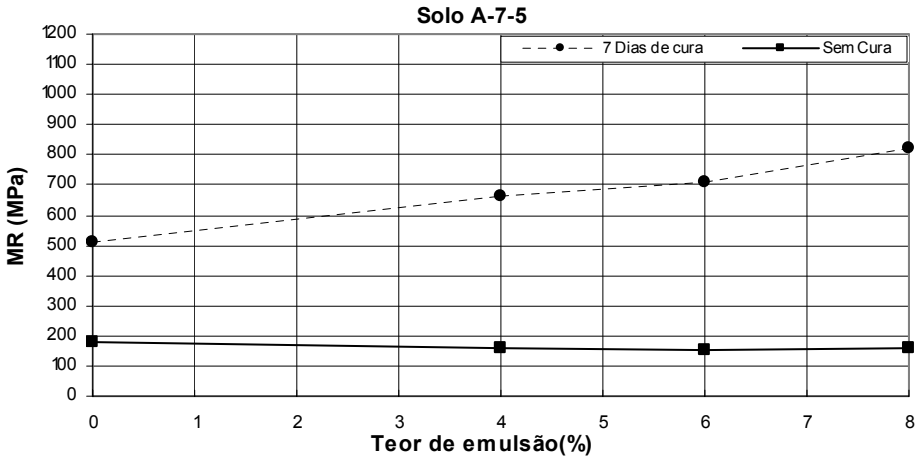


Figura 2.9 – Módulo de resiliência, das misturas com solo A-7-5, em função do tempo de cura e teor de emulsão (SOLIZ, 2007)

A Figura 2.9 mostra que para o solo A-7-5, o módulo de resiliência decresce com a adição da emulsão para a condição logo após a compactação. Entretanto, para a condição após 7 dias de cura o módulo de resiliência tem um incremento diretamente proporcional com o aumento do teor de emulsão.

A Figura 2.10 apresenta a variação do valor do módulo de resiliência em função do teor de emulsão para o solo A-2-4.

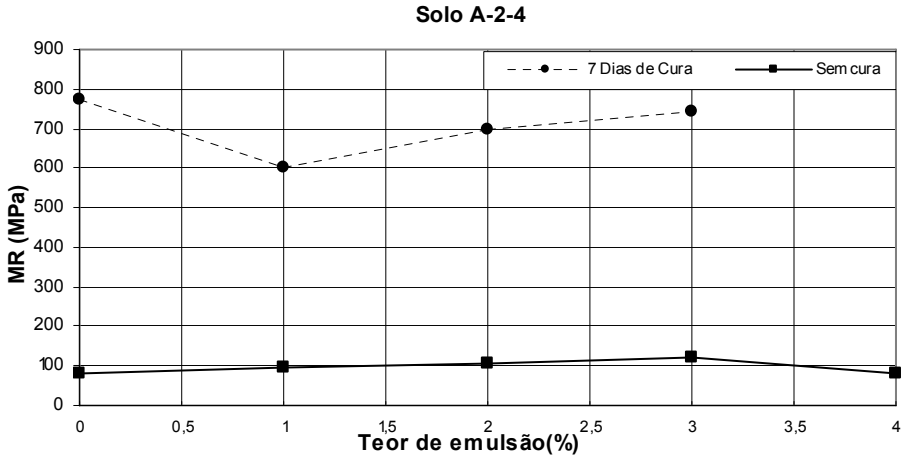


Figura 2.10 – Módulo de resiliência, das misturas com solo A-2-4, em função do tempo de cura e teor de emulsão (SOLIZ, 2007)

Observa-se na Figura 2.10 que para o solo A-2-4, ocorre um crescimento dos valores do módulo de resiliência. Para a condição de ensaio logo após compactação, quando há adição de emulsão asfáltica, para a condição após 7 dias de cura se verifica o incremento do módulo de resiliência com a adição de emulsão asfáltica.

É importante destacar que, nos trabalhos, os procedimentos empregados na análise das misturas não chegaram a definir se os ganhos de resistências atingidos pelos corpos-de-prova foram pela adição das emulsões asfálticas ou pelo processo de secagem.

2.4 OBSERVAÇÃO FINAL

Conforme relatado, as pesquisas apresentadas na Revisão Bibliográfica, não possibilitam que se distingam as influencias dos efeitos da secagem dos corpos-de-prova e da ação da emulsão no ganho de rigidez e resistência da mistura solo-emulsão. Além disto, também não é analisado o comportamento de misturas solo-emulsão sob o efeito da água. É por isso que no próximo capítulo serão abordados métodos onde o processo de secagem dos corpos-de-prova não tenha a severidade que foi mostrada nas pesquisas mencionadas anteriormente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização dos experimentos foram utilizados dois materiais: solos e emulsões asfálticas.

3.1.1 Solos

Foram utilizados dois tipos de solos para a composição das misturas de solo-emulsão. Sendo estes escolhidos por serem solos finos lateríticos, devendo possuir um deles uma fração arenosa e o outro uma fração argilosa.

3.1.1.1 Locais de coleta dos solos

Os solos escolhidos são provenientes de 2 diferentes taludes de rodovias situadas próximas ao Município de São Carlos – SP, apresentados na Figura 3.1. O solo 1 foi coletado em um talude na rodovia SP-300 (km 400), Pirajuí - Cafelândia; enquanto que o solo 2 foi coletado em um talude, abaixo da linha de seixos, junto à rodovia SP-304 (km 384+600), Borborema – Ibitinga.

Figura 3.1 – Lugares de coleta dos solos.

Após a coleta, os solos foram destorroados, peneirados e secos ao ar para depois serem homogeneizados e armazenados em sacos plásticos devidamente identificados.

3.1.1.2 Classificação de solos

Ambos os solos deveriam ser solos finos, segundo as classificações tradicionais, HRB *(Highway Research Board)* e USCS *(Unified Soil Classification System)*, e deveriam apresentar comportamento laterítico, segundo a classificação MCT.

Foram coletadas duas amostras de solos provenientes de diferentes locais e perfis da região próxima de São Carlos – SP. Estas duas amostras foram submetidas a ensaios para a determinação das massas específicas dos grãos (DNER-ME 93-64) e curvas granulométricas (DNER-ME 51-94). Após as análises das duas curvas granulométricas, verificou-se que os solos apresentavam composições granulométricas diferentes.

Em seguida, foram obtidos os limites de consistência destes materiais, permitindo-se, classificá-los segundo as classificações HRB e USCS. Para determinação dos limites de consistência foram desenvolvidas as atividades descritas nas normas DNER-ME 122-94 e DNER-ME 82-94 relativas à determinação do limite de liquidez e plasticidade, respectivamente. Finalmente, foram realizados os ensaios preconizados na metodologia MCT por Nogami & Villibor (1995) e assim, obtidos as suas respectivas classificações segundo a metodologia em questão.

Os ensaios de Mini-MCV e perda de peso por imersão são os parâmetros básicos para determinação da classificação segundo a metodologia MCT. Estes ensaios foram executados de acordo com as normas: DNER-ME 256/94 “Solos Compactados com Equipamento Miniatura – Determinação da Perda de Massa por Imersão”; DNER-ME 254/94 “Solos Compactados em Equipamentos Miniatura-Mini-CBR e Expansão” e DNER-CLA 259/96 Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura”. A Tabela

3.1 apresenta os resultados da caracterização realizada na pesquisa de Takeda (2006) dos dois solos escolhidos nesta pesquisa, além da classificação geotécnica por diferentes metodologias.

Tabela 3.1 – Classificações realizadas por Takeda (2006) dos dois solos escolhidos.

Amostras	Limites de consistência		Classificações		
	LL	IP	HRB	USCS	MCT
1	31	13	A-2-6	SC	LA’
2	50	13	A-7-5	ML	LG’

Analisando os resultados apresentados na Tabela 3.1, os solos escolhidos para o desenvolvimento da pesquisa foram classificados como solo laterítico arenoso (LA’) e solo laterítico argiloso (LG’), pela classificação MCT. Pelas classificações tradicionais, pertencem aos grupos A-2-6 e A-7-5 pela classificação HRB e pela classificação USCS nos grupos SC e ML.

3.1.1.3 Características e classificações dos solos escolhidos

A caracterização dos solos foi refeita nesta etapa da pesquisa para a verificação dos resultados dos ensaios dos limites de Atterberg e massa específica dos grãos das amostras dos solos escolhidos e são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Resultados dos ensaios dos limites de Atterberg e de massa específica dos sólidos.

	Solo 1	Solo 2
Limite de liquidez (%)	31,00	50,15
Índice de plasticidade (%)	12,96	13,01
Massa específica dos sólidos (g/cm^3)	2,651	2,928

Os solos 1 e 2 foram identificados como solo arenoso e solo argiloso, respectivamente. Na Figura 3.2 podem-se observar as curvas granulométricas de cada um desses solos.

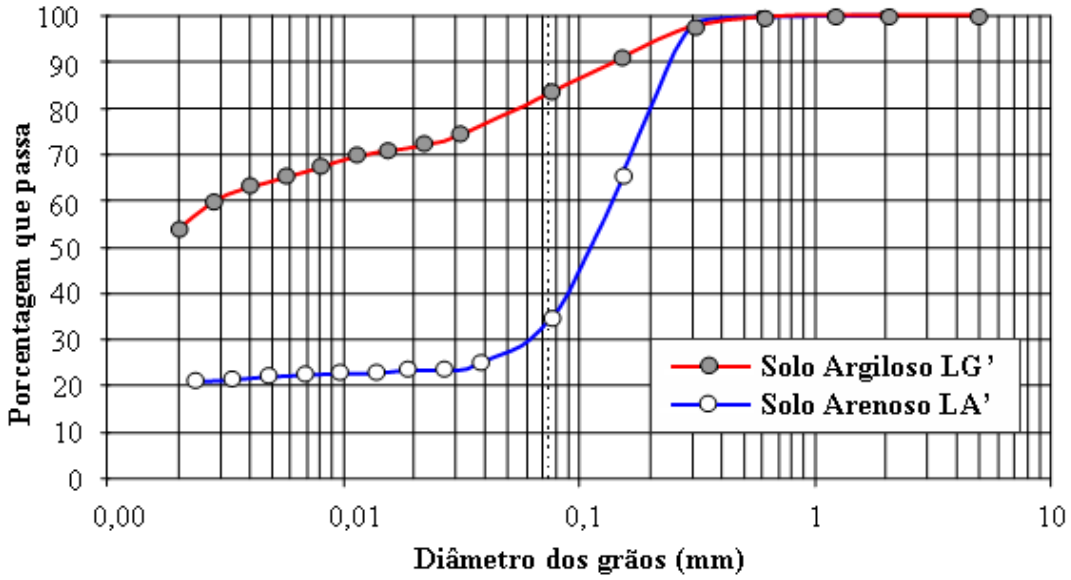


Figura 3.2 - Curvas granulométricas dos solos arenoso e argiloso.

Segundo metodologia MCT, os resultados enquadram o solo arenoso como solo LA' (arenoso laterítico) e o solo argiloso como solo LG' (argiloso laterítico). A Figura 3.3 mostra a posição das amostras no ábaco da classificação MCT, segundo os coeficientes c' e e'.

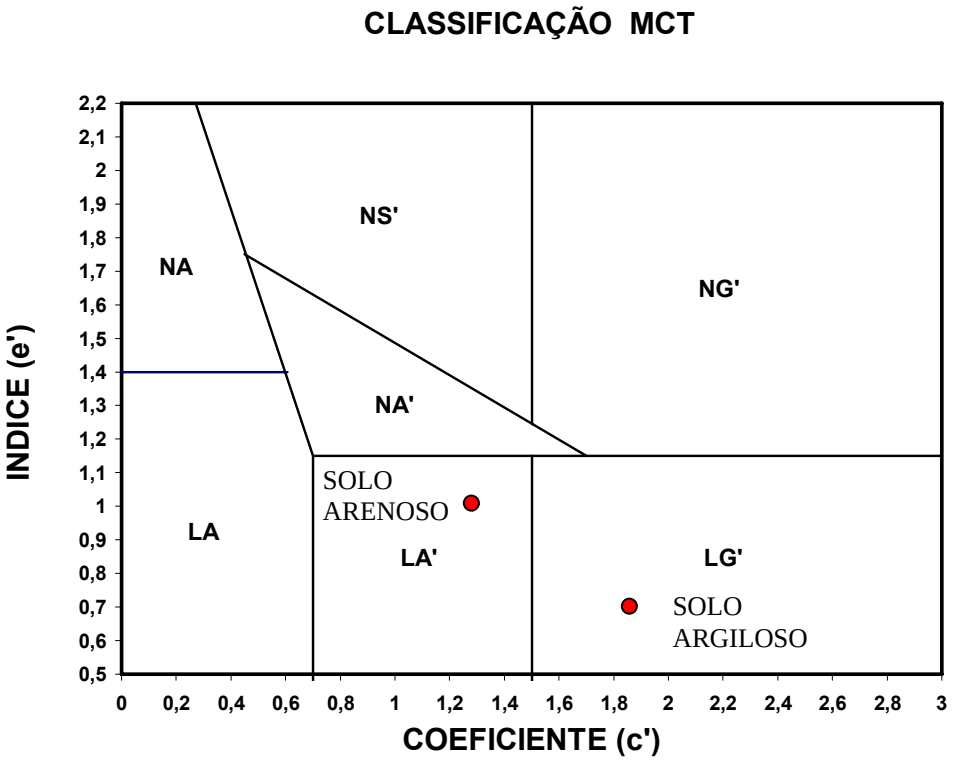


Figura 3.3 - Ábaco da classificação MCT (Fonte: NOGAMI *et al.*, 1995).

Os resultados apresentados anteriormente permitiram a classificação dos solos segundo as classificações geotécnicas HRB, USCS e MCT. Estes resultados estão mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Classificação dos solos estudados

Classificação	Solo 1	Solo 2
HRB	A-2-6	A-7-5
USCS	SC	ML
MCT	LA’	LG’

3.1.2 Emulsão asfáltica

A emulsão asfáltica utilizada na pesquisa é proveniente da empresa BETUNEL, filial Ribeirão Preto – SP.

Numa primeira fase da pesquisa foram escolhidos três tipos de emulsão asfáltica: RR-1C, RM-1C e RL-1C, devido ao fato destes materiais serem similares aos usados em pesquisas anteriores por Miceli (2006) e Soliz (2007) e apresentarem bons resultados na estabilização de solos.

Foram realizados ensaios exploratórios com cada uma das emulsões para determinar quais destas apresentaria melhor desempenho e compatibilidade com ambos os solos estudados. Além disso, foram feitos ensaios de laboratório para caracterizar cada uma das emulsões estudadas, os quais são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Resultados das emulsões asfálticas utilizadas neste estudo.

Métodos	Unidades	Ensaios	Resultados			Especificação	
			RR-1C	RM-1C	RL-1C	Mínimo	Máximo
NBR 6570	% em peso	Sedimentação	3	2,5	1,6	-	5
NBR 14393	% em peso	Peneiração	0,11	0,10	0,10	-	0,15
NBR 6567	-	Carga de partícula	+	+	+	Positiva	
NBR 14896	% em peso	Resíduo	60	60	61	62	

3.1.2.1 Escolha da condição de cura e condição de ensaio

Entre os ensaios exploratórios realizados, numa primeira fase, procedeu-se à mistura de cada um dos solos com cada uma das emulsões estudadas para os teores de 2, 4, 6 e 8%, controlando os tempos que demoram os solos em serem misturados com cada uma das emulsões e ao mesmo tempo determinou-se qual das emulsões apresentou melhor dispersão na mistura solo-emulsão.

Uma vez determinada a emulsão a ser usada, procedeu-se à segunda fase dos experimentos exploratórios na qual se determinou a melhor condição de cura para os corpos-de-prova.

Nesta fase procedeu-se primeiramente a determinar o efeito do tempo de cura nas misturas solo-emulsão, para isso foram preparados dois tipos de misturas, o primeiro tipo não teve tempo de cura, sendo moldados os corpos-de-prova imediatamente após misturar o solo com a emulsão dosada, o segundo tipo de mistura foi deixado em sacolas seladas por um período de 24 horas, para logo após serem moldados os corpos-de-prova. Ainda nesta fase foi analisado o efeito da imersão em água dos corpos-de-prova, para isso foram ensaiados corpos-de-prova com e sem imersão, não selados e selados com papel filme (PVC) respectivamente.

Uma vez determinados quais os efeitos do tempo de cura das misturas, o efeito da imersão em água e da selagem dos corpos-de-prova, procedeu-se a determinar qual seria a melhor condição de cura dos corpos-de-prova prévia a estes serem esaiados.

Para determinar a condição de cura foram estudadas três condições, as quais são citadas na seqüência:

- Primeira opção: nesta condição, os corpos-de-prova logo após a sua moldagem foram deixados expostos ao ar livre no laboratório durante um período de 7 dias;
- Segunda opção: os corpos-de-prova foram envolvidos e selados com papel filme (PVC) logo após a sua moldagem e ficaram expostos ao ar livre no laboratório durante um período de 7 dias;
- Terceira opção: nesta condição, os corpos-de-prova foram selados e envolvidos em papel filme (PVC) logo após a sua moldagem e ficaram na câmera úmida durante um período de 7 dias.

Uma vez passado o tempo de cura metade dos corpos-de-prova foram ensaiados à compressão simples, a outra metade foi submetida a um período de imersão de 4 horas, para verificar o tempo que os corpos-de-prova demoram em se desintegrar. Nos casos que não aconteceu a desintegração dos corpos-de-prova, fez-se ensaio à compressão simples e assim foi feita uma comparação dos valores da resistência à compressão simples, as quais foram obtidas para diversas misturas, nas três condições de cura e para as duas condições de ensaio.

3.2 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS

Os teores de emulsão de 2, 4, 6 e 8% escolhidos inicialmente para compor as misturas de solo-emulsão foram usados no decorrer dos ensaios. O solo *in natura* e os teores selecionados foram comparados na pesquisa para

obter resultados que possibilitem a comparação dos desempenhos das misturas envolvidas e a sua aplicabilidade na construção de rodovias.

3.3 ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS

O estudo experimental para a determinação do comportamento mecânico das misturas foi dividido em duas etapas: estudo preliminar e estudo definitivo.

3.3.1 Estudo preliminar

Nesta etapa, foram realizados ensaios de compactação, na energia do Proctor normal, seguindo os procedimentos da norma da DNER-ME 162/94 para obtenção da umidade ótima e massa específica seca máxima de cada uma das misturas estudadas.

As misturas foram executadas com os teores de emulsão estabelecidos e calculados em relação à massa de solo seco, levando-se em conta a umidade higroscópica dos materiais e a água contida nas emulsões.

Os valores obtidos, w_0 e ρ_{dmax}, orientaram a moldagem dos corpos de prova usados para a determinação do comportamento mecânico das misturas. No capítulo 4 serão discutidos os resultados dos ensaios de compactação.

3.3.2 Estudo definitivo

Após a determinação do teor de umidade ótima e massa específica seca máxima de cada uma das misturas, foi dado prosseguimento às atividades definitivas relacionadas à pesquisa.

Nessas atividades foram preparados os corpos-de-prova para serem submetidos aos ensaios de CBR, compressão simples, compressão diametral e triaxiais cíclicos.

3.3.2.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Para os ensaios à compressão simples e à compressão diametral, as dimensões dos corpos de prova foram de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura; para os ensaios triaxiais as dimensões dos corpos de prova foram de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura; para o ensaio de CBR utilizou-se os moldes específicos para este tipo de ensaio. Foram adotados os procedimentos do estudo preliminar para preparação e mistura dos materiais.

Os corpos-de-prova para os ensaios de compressão simples e compressão diametral foram moldados através de compressão estática em três camadas iguais, e em cinco camadas iguais para os ensaios triaxiais, a prensa utilizada é apresentada na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Prensa utilizada para compactação dos corpos de prova.

Os corpos-de-prova utilizados nos ensaios à compressão simples e à compressão diametral foram moldados em um cilindro de bronze, como o apresentado na Figura 3.5. Os corpos-de-prova para os ensaios triaxiais foram moldados em um cilindro de aço igual ao da Figura 3.6.

Antes de se iniciar a compactação das misturas, procedeu-se à lubrificação dos cilindros com vaselina para facilitar a posterior extração do corpo-de-prova. O controle das espessuras das camadas foi feito através dos espaçadores, atingindo-se para cada camada, uma altura correspondente a cada espessura as quais somadas atingiram a altura total do corpo-de-prova.

Figura 3.5 – Cilindros de bronze utilizados na moldagem dos corpos-de-prova.

Figura 3.6 – Cilindros de aço utilizados na moldagem dos corpos-de-prova.

Após a compactação, os corpos-de-prova foram extraídos dos cilindros com auxílio de macacos hidráulicos, conforme mostrados na Figura 3.7. Posteriormente, foram tomadas medidas das umidades, dimensões e massas

para avaliar o grau de compactação, aceitando-se uma variação de $\pm 2\%$ do grau de compactação pretendido de 100%.

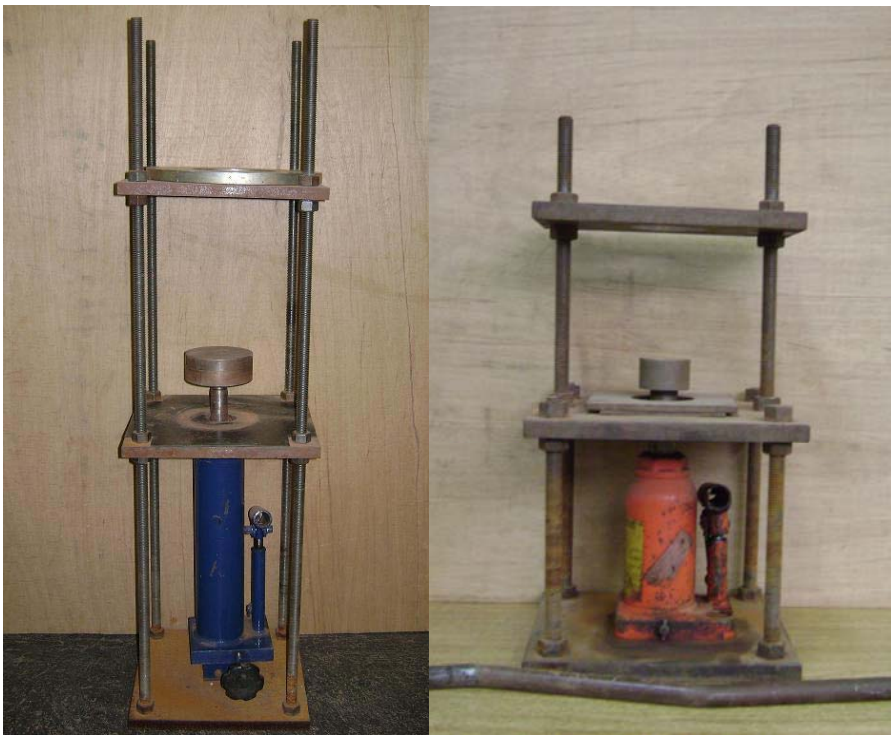


Figura 3.7 – Macacos hidráulicos utilizados na desmoldagem dos corpos-de-prova.

Finalmente os corpos-de-prova foram submetidos aos processos de cura de 3, 7, 14 e 28 dias. Nesta fase, as amostras foram seladas e envolvidas com papel filme (PVC) para evitar perda de umidade, e submetidas ao processo de cura ao ar livre em laboratório (Figura 3.8).

Figura 3.8 – Cura dos corpos de prova.

Para cada uma das misturas e condições analisadas foram moldados três corpos-de-prova (3 repetições de ensaio). Durante toda pesquisa foram moldados 972 corpos-de-prova. Foram ensaiados 606 corpos-de-prova à compressão simples e 366 à compressão diametral distribuídos da seguinte maneira:

- 2 Solos (LA' e LG')
- 2 Emulsões (RL-1C de uso convencional e RL-1C dosada)
- 5 Teores (solo *in natura,* 2, 4, 6 e 8% de emulsão)
- 3 Repetições
- 4 Tempos de cura (3, 7, 14 e 28 dias)
- 1 Condição de cura (corpos-de-prova selados e curados ao ar)
- 2 Condições de ensaio (sem imersão e imerso 4 horas em água)

Para os ensaios triaxiais cíclicos foram ensaiados 36 corpos de prova distribuídos da seguinte maneira:

- 2 Solos (LA' e LG')
- 2 Emulsões (RL-1C de uso convencional e RL-1C dosada)
- 5 Teores (solo *in natura,* 2, 4, 6 e 8% de emulsão)
- 1 Repetição
- 1 Tempo de cura (28 dias)
- 1 Condição de cura (corpos-de-prova selados e curados ao ar)
- 2 Condições de ensaio (sem imersão e imerso 4 horas em água)

3.3.2.2 Ensaios triaxiais cíclicos

Os ensaios triaxiais cíclicos foram realizados, decorrido o tempo de cura de 28 dias, no laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos (LE - STT). A prensa operou com um sistema de carregamento pneumático sendo capaz de aplicar cargas cíclicas com intensidade, duração e freqüência selecionadas em um computador que trabalha em conjunto com o equipamento triaxial.

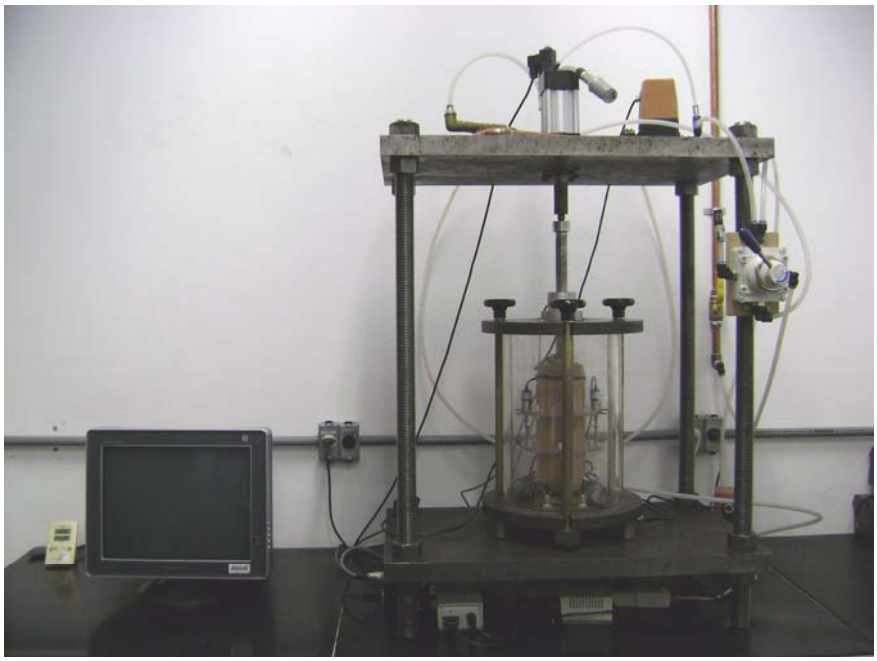


Figura 3.9 – Visão geral da prensa utilizada para os ensaios triaxiais cíclicos.

A célula de carga utilizada é da marca *GEFRAN* de capacidade de carga de 5kN fixada internamente na câmara triaxial como mostra Figura 3.9. O fluido de confinamento utilizado foi o ar. Os deslocamentos resilientes foram medidos por dois LVDTs (Linear Variable Differential Transducers) fixados a um terço médio do corpo de prova como mostra a Figura 3.10.

Figura 3.10 – Corpo de prova instalado na base da câmara triaxial.

Cada ensaio foi desenvolvido em duas fases: inicialmente, o corpo-de-prova foi submetido a uma fase de condicionamento, aplicando-se uma seqüência de carregamentos dinâmicos axiais com a finalidade de eliminar as grandes deformações permanentes que ocorrem nas primeiras

aplicações de tensão desvio e de reduzir o efeito da história das tensões no valor do módulo resiliente. Na fase posterior, etapa em que é determinado o módulo de resiliência, as tensões aplicadas, com procedimento semelhante à fase inicial, foram definidas de acordo com a norma da AASHTO T 397-99 cuja seqüência de aplicações de carga estão apresentadas na Tabela 3.5, sendo para cada estado de tensão aplicadas 100 repetições.

A duração do carregamento foi de 0,1seg com 0,9 seg de descanso totalizando um ciclo de aplicação de carga de 1 seg. De acordo com o procedimento adotado pela norma da AASHTO T 307-99, antes da aplicação da carga axial (P máxima), deve-se aplicar uma carga de contato (P contato), entre o pistão e o cabeçote do corpo de prova, de valor igual a 10% da carga axial máxima como mostra a Tabela 3.5. Portanto, a carga cíclica aplicada é a diferença entre a carga de contato e a carga máxima. Estas cargas divididas pela área do corpo de prova correspondem às tensões aplicadas representadas na Tabela 3.5.

Durante os ciclos de aplicação de carga, para cada par de tensões (σ_3, σ_d) foram registrados os deslocamentos verticais detectados pelos dois LVDT's e posteriormente calculada a média dos deslocamentos.

Tabela 3.5 – Seqüência de aplicação de tensões de carregamento e seu número de repetições – AASHTO T 397-99.

Etapa	σ_3 (kPa)	σ_a (máxima) (kPa)	σ_d (kPa)	σ (contato)(kPa)	Repetições
0	103,4	103,4	93,1	10,3	500-1000
1	20,7	20,7	18,6	2,1	100
2	20,7	41,4	37,3	4,1	100
3	20,7	62,1	55,9	6,2	100
4	34,5	34,5	31,0	3,5	100
5	34,5	68,9	62,0	6,9	100
6	34,5	103,4	93,1	10,3	100
7	68,9	68,9	62,2	6,9	100
8	68,9	137,9	124,1	13,8	100
9	68,9	206,8	186,1	20,7	100
10	103,4	68,9	62,0	6,9	100
11	103,4	103,4	93,1	10,3	100
12	103,4	206,8	196,1	20,7	100
13	137,9	103,4	93,1	10,3	100
14	137,9	137,9	124,1	13,8	100
15	137,9	275,8	248,2	27,6	100

3.3.2.3 Ensaios de compressão simples

Os ensaios de compressão simples foram realizados decorridos os tempos de cura de 3, 7, 14 e 28 dias, sendo que a metade dos corpos de prova ensaiados foi imersa em água, durante 4 horas, antes da execução do ensaio.

Os ensaios foram executados no laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, seguindo os procedimentos adotados pela norma NBR 12770/1992. Utilizou-se a prensa do Laboratório de Estradas apresentada na Figura 3.11 que possibilitou a realização do ensaio com velocidade de carga de 1,24 mm/min até o rompimento do corpo de prova.

Figura 3.11– Prensa utilizada para os ensaios de compressão simples.

3.3.2.4 Ensaios de compressão diametral

Com o objetivo de determinar a resistência à tração indireta dos materiais envolvidos na pesquisa foram realizados ensaios de compressão diametral de corpos de prova depois de passados os tempos de cura e para as condições mencionadas no item 3.3.2.1. Estes ensaios foram desenvolvidos no laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos que possibilitou executar os ensaios na prensa apresentada na Figura 3.12 com velocidade de carregamento de 1,24 mm/min até a ruptura, por separação das duas metades do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical.

Figura 3.12 – Prensa utilizada nos ensaios de compressão diametral.

Após registrado o valor da carga de ruptura, o valor da resistência à tração do corpo de prova foi calculado adotando-se a fórmula proposta pela norma ABNT (1990) M1 e descrita pela expressão 3.1:

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \qquad \textbf{(3.1)}$$

onde:

σ_R - resistência à tração, kgf/cm^2;

F – carga de ruptura, kgf;

D – diâmetro do corpo de prova, cm;

H – altura do corpo de prova, cm.

3.3.2.5 Índice de suporte Califórnia

Para os ensaios de CBR os corpos de prova foram moldados na umidade ótima e massa específica seca máxima. Os ensaios foram executados no Departamento de Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, seguindo os procedimentos da norma DNER-ME 049/94 .

Antes de serem submetidos à penetração, a metade dos corpos-de-prova foi deixada curar ao ar durante 28 dias e posteriormente, colocada no tanque de imersão durante 4 dias. A outra metade dos corpos-de-prova foi colocada no tanque de imersão durante 4 dias, logo após a sua compactação. A expansão foi medida somente no período em que os corpos de prova encontravam-se imersos na água, com extensômetro de 0,01 mm de precisão.

Foram confeccionados e ensaiados 3 corpos-de-prova para cada composição das misturas com o solo *in natura* e para os teores de 2, 4, 6 e 8% de emulsões dosada, os corpos-de-prova foram imersos em água durante 4 dias logo após a moldagem e após 28 dias de cura ao ar livre em laboratório, totalizando 30 corpos-de-prova.

Após decorrer o tempo de cura, os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de penetração na prensa conforme ilustra a Figura 3.13., tendo sido utilizada uma velocidade de carga de 1,24 mm/min.

Figura 3.13 – Prensa utilizada nos ensaios de CBR.

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.4.1 Método para aceitação dos corpos-de-prova

Para analisar os resultados dos ensaios de compressão simples, compressão diametral, triaxial cíclico e índice de suporte Califórnia foi aplicado o teste Grubbs (GRUBBS, 1969), pois este teste possibilita a identificação de *outliers*.

Um teste de hipótese estatístico é o critério que permite a aceitação ou rejeição da hipótese em consideração. A validade dos testes estatísticos depende da existência de réplicas, pois estas fornecem uma estimativa do erro aleatório, e tornam possível o uso de tabelas de significância, construídas sob a consideração de que os erros são independentes (GARCIA-DIAZ & PHILLIPS, 1995).

Para aplicação do teste de Grubbs primeiro deve-se verificar que os dados podem ser razoavelmente representados por uma distribuição normal. O teste de Grubbs é definido pelas seguintes hipóteses: hipótese nula (H_0), não existe nenhum *outlier* nos resultados dos ensaios; hipótese alternativa (H_1), existe pelo menos um *outlier* nos resultados dos ensaios.

Este teste detecta um *outlier* cada vez que é realizado, mesmo que é eliminado dos dados e o teste repete-se até que não sejam detectados *outliers*. Para a aplicação deste teste deve-se verificar dentre os dados de um mesmo tratamento quais são os valores máximo e mínimo. A partir destes valores calcular o valor estatístico G definido pela equação:

$$G = \frac{\max\left|Y_i - \overline{Y}\right|}{s} \tag{3.2}$$

Onde:

Y_i = valores máximo e mínimo dentro do conjunto de resultados de um mesmo tratamento;

$\overline{Y}$ = média dos resultados de um mesmo tratamento;

s = desvio padrão dos resultados de um mesmo tratamento.

O valor estatístico G deve ser comparado com o valor $G_{critico}$ que depende do número de repetições (N) e grau de confiança (α) o resultado é considerado um *outlier* quando G > $G_{crítico}$.

Para esta pesquisa adotou-se nível de confiança de 95% e foram feitas três observações para cada ensaio, sendo o $G_{crítico}$ utilizado 1,15.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta a análise dos resultados dos ensaios a que foram submetidas as misturas de solo-emulsão. Os ensaios em questão, compactação, CBR, compressão simples e diametral, e triaxial cíclico, foram realizados com o objetivo de avaliar a w_o e ρ_{dmax} e as propriedades mecânicas destas misturas.

Para cada uma das misturas, preliminarmente, apresentam-se e discutem-se os resultados dos ensaios de compactação e CBR, analisando a influência de duas emulsões de ruptura lenta, uma de uso convencional e outra dosada especialmente para melhorar a trabalhabilidade e dispersão nos solos. Posteriormente, são analisadas as resistências à compressão simples e à tração indireta, determinadas através dos ensaios de compressão simples e diametral, respectivamente. Em seguida, apresentam-se e discutem-se os resultados dos ensaios triaxiais cíclicos. As análises contemplam a influência de variáveis, como tipo de solo, tipo e tempo de cura, teor de emulsão e condições de ensaios nas propriedades das misturas.

4.2 ENSAIOS PARA A ESCOLHA DA EMULSÃO

Para a escolha do tipo de emulsão foram feitas misturas com 2 kg de cada solo estudado e as emulsões RR-1C, RM-1C e RL-1C, para determinar o tempo que estas demoram em serem misturadas à mão e verificar a dispersão que estas apresentam para os teores de 2, 4, 6 e 8%. A Tabela 4.1 apresenta a variação dos tempos de mistura com o tipo e teor de emulsão para as misturas compostas com os solos de comportamento laterítico arenoso (LA') e argiloso (LG').

Tabela 4.1 - Valores dos tempos de mistura em função do tipo e teor de emulsão.

Tipo de Emulsão	Solo	Teor de emulsão (%)	Tempo de Mistura (min)
RR-1C	LA'	2	9
		4	10
		6	14
		8	14
	LG'	2	10
		4	12
		6	16
		8	16
RM-1C	LA'	2	10
		4	10
		6	12
		8	13
	LG'	2	10
		4	13
		6	15
		8	15
RL-1C	LA'	2	5
		4	5
		6	7
		8	10
	LG'	2	7
		4	7
		6	10
		8	12

Analisando-se a Tabela 4.1 observa-se que teores crescentes de emulsão conduziram a maiores tempos de mistura. Este comportamento é observado com os três tipos de emulsão. Comparando-se as misturas compostas com as emulsões RR-1C, RM-1C e RL-1C, observa-se que os tempos de mistura diminuem para cada tipo de emulsão, respectivamente. Comparando-se o tipo de solo nas misturas, observa-se que o solo LA' apresenta menores tempos de mistura que o solo LG'. Verifica-se que o menor tempo de mistura ocorre para a emulsão RL-1C, que também apresenta menores formações de grumos para todos os teores.

A emulsão RL-1C foi escolhida para ser utilizada no decorrer da pesquisa. Além disso, utilizou-se outra emulsão RL, dosada especialmente para melhorar ainda mais a dispersão e a trabalhabilidade das misturas.

A Figura 4.1 mostra a dispersão da emulsão RL-1C de uso convencional e da emulsão RL-1C dosada para um corpo-de-prova estudado, observando-se a melhora que esta última apresenta no tocante à dispersão da emulsão no solo.

Figura 4.1 – Misturas feitas com emulsões RL-1C de uso convencional e RL-1C dosada

4.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

4.3.1 Ensaios de compactação das misturas de solo-emulsão

Para as misturas de solo-emulsão, realizaram-se os ensaios de compactação na energia normal do ensaio Proctor, utilizando-se o solo *in natura* e os teores de 2, 4, 6 e 8% de emulsão asfáltica em relação à massa do solo seco. As Figuras 4.2 e 4.3 ilustram as variações das curvas de compactação para cada um destes teores, respectivamente para a emulsão dosada e a emulsão de uso convencional

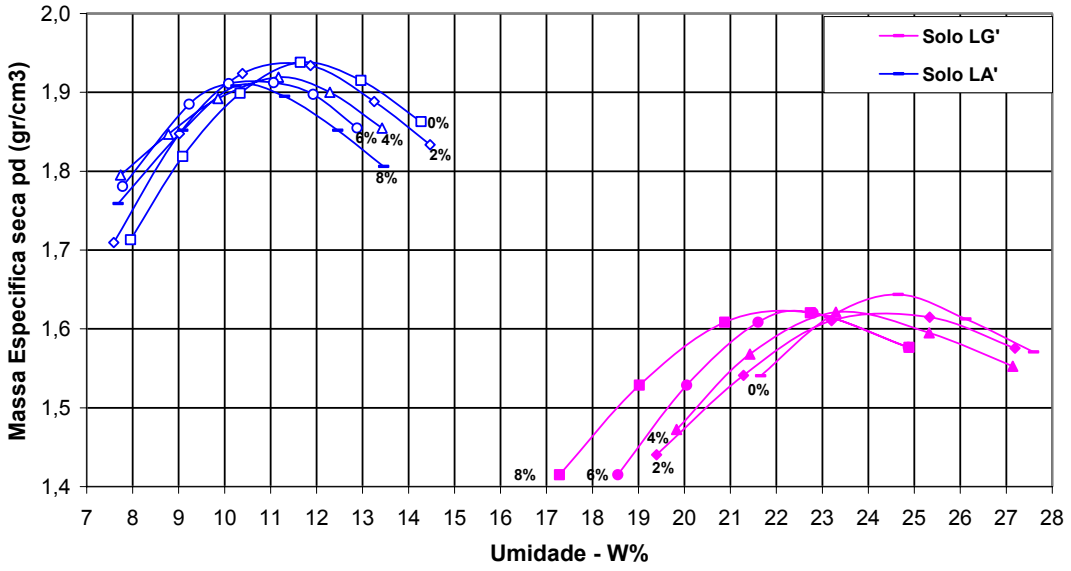


Figura 4.2 – Curvas de compactação dos solos e das misturas de solo-emulsão com 0, 2, 4, 6 e 8% de emulsão (RL-1C Dosada).

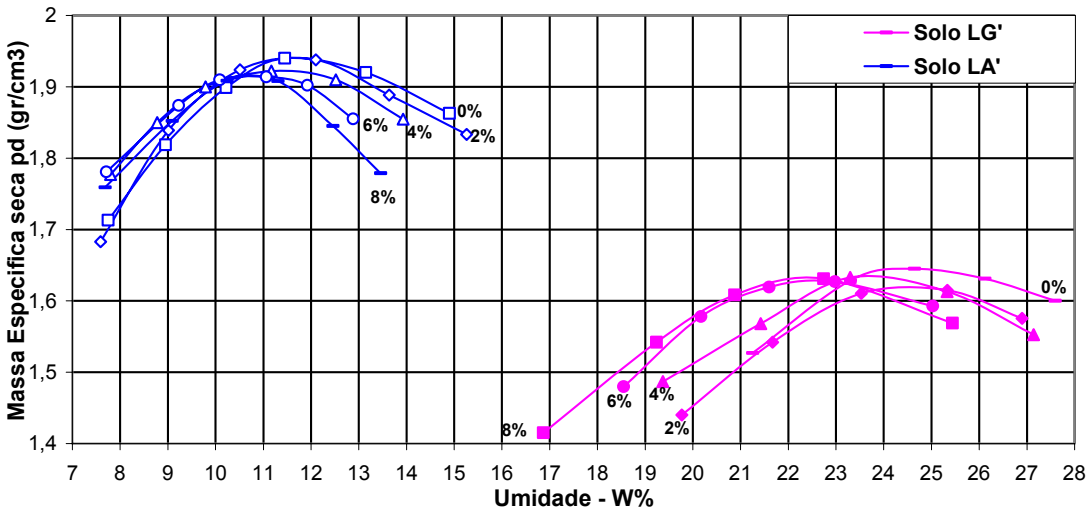


Figura 4.3 – Curvas de compactação dos solos in natura e das misturas de solo-emulsão com 0, 2, 4, 6 e 8% de emulsão (RL-1C Convencional).

Analisando-se as curvas de compactação apresentadas nas Figuras 4.2 e 4.3**,** observa-se, que de forma geral, a adição e o incremento de emulsão fazem com que as curvas se desloquem para baixo e para o lado esquerdo tanto para o solo LA' quanto para o solo LG'. Observou-se também que a ρ_{dmax}

e w_o das misturas com a emulsão de uso convencional e a emulsão dosada são sensíveis à variação da umidade de compactação.

As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam a variação dos valores de teor ótimo de umidade (w_o) e massa específica seca máxima (ρ_{dmax}) obtidos para os solos arenoso (LA') e argiloso (LG'), e diferentes teores de emulsão, respectivamente para as emulsões dosada e de uso convencional.

Tabela 4.2 - Valores de umidade ótima e massa específica seca máxima para o solo in natura e as misturas de solo-emulsão com 2, 4, 6 e 8% de emulsão dosada.

Porcentagem (%)	Emulsão asfáltica de ruptura lenta RL-1C (Dosada)			
	Solo Arenoso LA'		Solo Argiloso LG'	
	ρ_{dmax} (g/cm^3)	Wo (%)	ρ_{dmax} (g/cm^3)	Wo (%)
0	1,940	11,90	1,647	24,50
2	1,935	11,42	1,630	23,96
4	1,924	11,11	1,628	23,23
6	1,920	10,74	1,626	22,51
8	1,910	10,39	1,625	22,00

Tabela 4.3 - Valores de umidade ótima e massa específica seca máxima para o solo in natura e as misturas de solo-emulsão com 2, 4, 6 e 8% de emulsão convencional.

Porcentagem (%)	Emulsão asfáltica de ruptura lenta RL-1C (Convencional)			
	Solo Arenoso LA'		Solo Argiloso LG'	
	ρ_{dmax} (g/cm^3)	Wo (%)	ρ_{dmax} (g/cm^3)	Wo (%)
2	1,940	11,37	1,635	23,82
4	1,925	11,23	1,630	23,19
6	1,915	10,92	1,625	22,65
8	1,908	10,63	1,620	22,05

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam, respectivamente as variações dos valores da massa específica seca máxima (ρ_{dmax}) e teor ótimo de umidade (w_o), para o solo *in natura* e todos os teores de emulsão, usando a emulsão dosada e a de uso convencional.

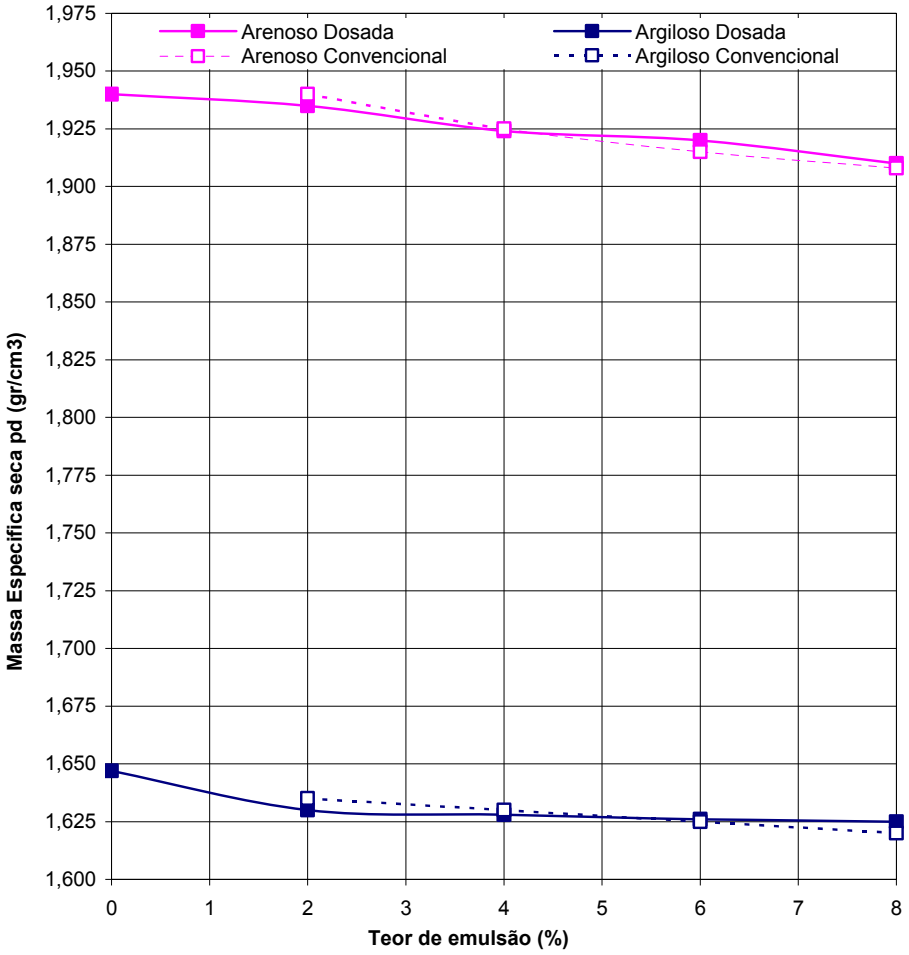


Figura 4.4 – Variação da massa específica seca máxima com o teor de emulsão para as misturas de solo-emulsão.

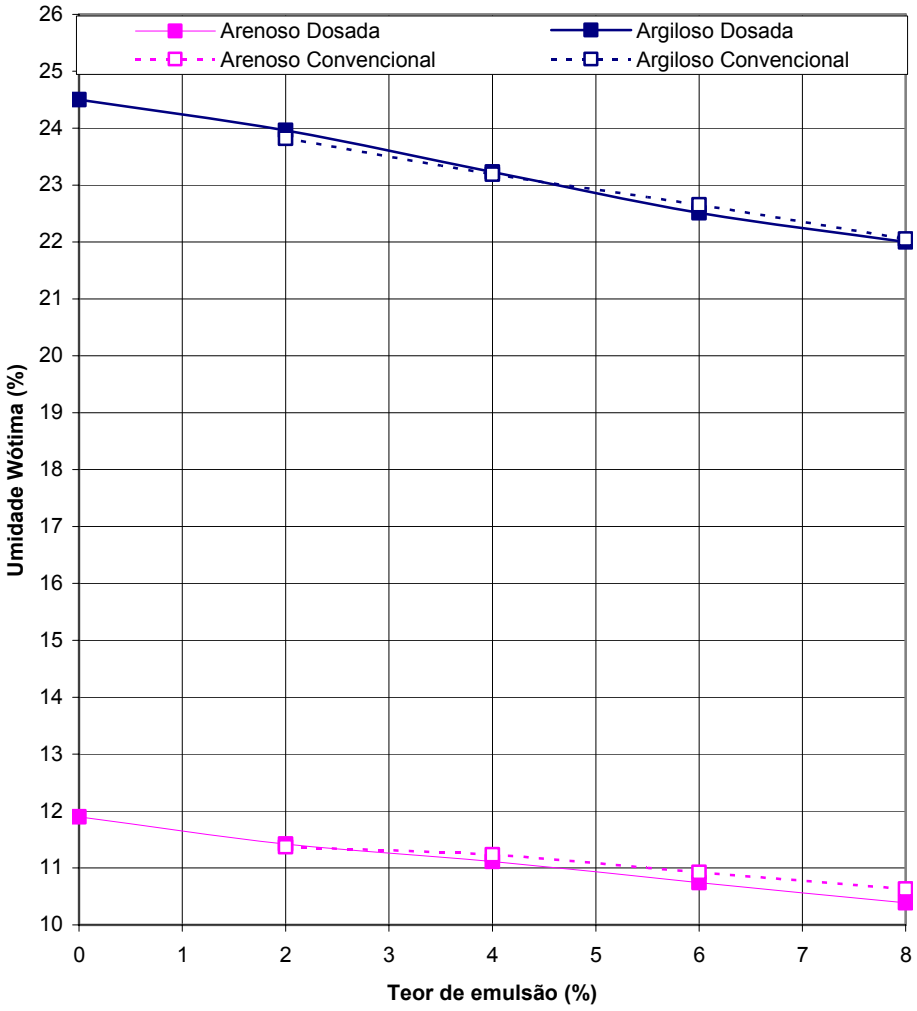


Figura 4.5 – Variação da umidade ótima com o teor de emulsão para as misturas de solo-emulsão.

Analisando-se os valores das Tabelas 4.2 e 4.3 e as ilustrações das variações da massa específica seca máxima (ρ_{dmax}) e teor ótimo de umidade (w_o) com os teores de emulsão apresentados nas Figuras 4.4 e 4.5, respectivamente, observa-se que para ambos os solos estudados, o acréscimo e o aumento do teor de emulsão produz decréscimos nos valores de ρ_{dmax} e w_o. Observa-se também que para as misturas com emulsão dosada e emulsão de uso convencional, os valores de ρ_{dmax} e w_o não apresentam variações significativas. Finalmente, para o solo LG', na média, a ρ_{dmax} é 85% do valor

atingido pelo solo LA' e para o solo LA', na média, a w_o é 52% do valor atingido pelo solo LG'

4.3.2 Ensaios à compressão simples para determinar a melhor condição de cura pré e pós-compactação

4.3.2.1 Efeito da cura pré-compactação na resistência das misturas

A Tabela 4.4 apresenta as duas condições de pré-compactação (mistura sem cura e curada 24 horas) às quais as misturas de ambos os solos estudados foram submetidas nesta tabela também são apresentadas as condições de cura às quais os corpos-de-prova foram submetidos para cada uma das condições de mistura pré-compactação mencionadas anteriormente.

Tabela 4.4 – Condições de pré-compactação das misturas estudadas e condições de curas à que os corpos-de-prova foram submetidos.

Mistura Condição pre-compactação	Corpos-de-prova Condição de cura
Mistura sem cura Mistura curada 24 horas	Ao ar por 7 dias
	Ao ar por 7 dias e 4 horas de imersão prévia em água
	Ao ar selado por 7 dias
	Ao ar selado por 7 dias e 4 horas de imersão prévia em água

As Figuras 4.6a, 4.6b e 4.7 apresentam as variações dos valores da resistência à compressão simples (RCS) com o teor de emulsão para os solos argiloso e arenoso segundo as condições descritas na Tabela 4.4. Para o solo argiloso, a ilustração foi desdobrada nas Figuras 4.6a e 4.6b, pois os ensaios realizados para corpos-de-prova curados ao ar e sem imersão (vide Figura 4.6a), conduziram a valores muito elevados quando comparados a corpos-de-prova curados nesta mesma condição e ensaiados após imersão e corpos-de-prova curados selados ao ar e ensaiados sem imersão e após imersão (vide Figura 4.6b).

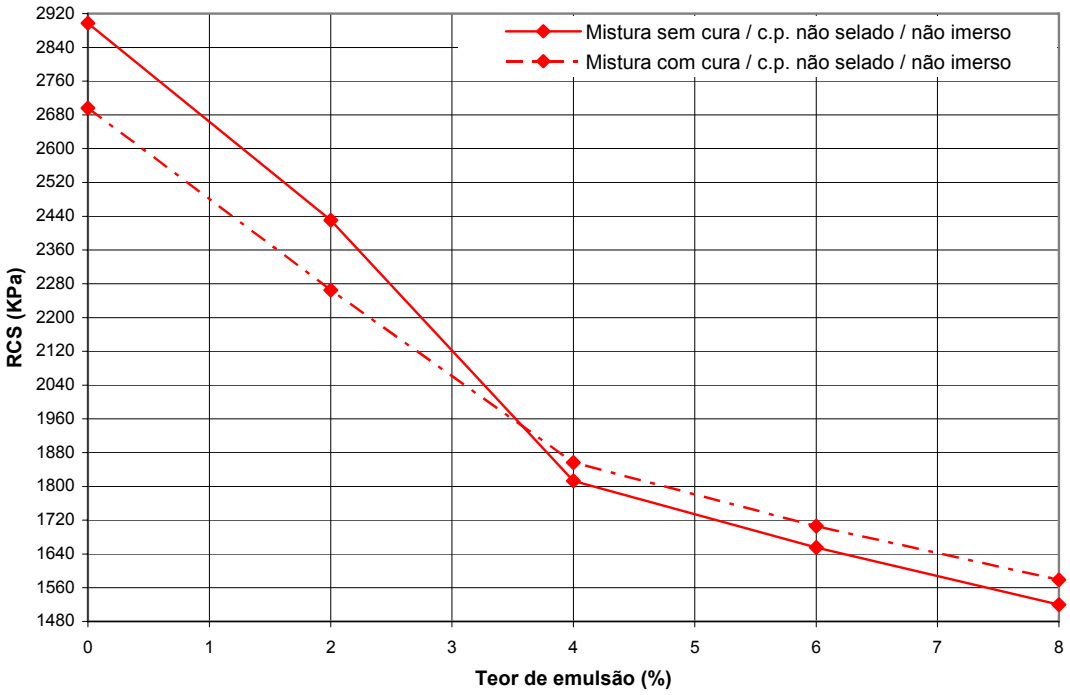


Figura 4.6a – Resistência à compressão simples das misturas solo-emulsão sem cura e com 24 horas de cura pré-compactação, para o solo argiloso *in natura* e com teores de 2, 4, 6 e 8% de emulsão em corpos-de-prova selados e não selados para a condição sem imersão pós-compactação.

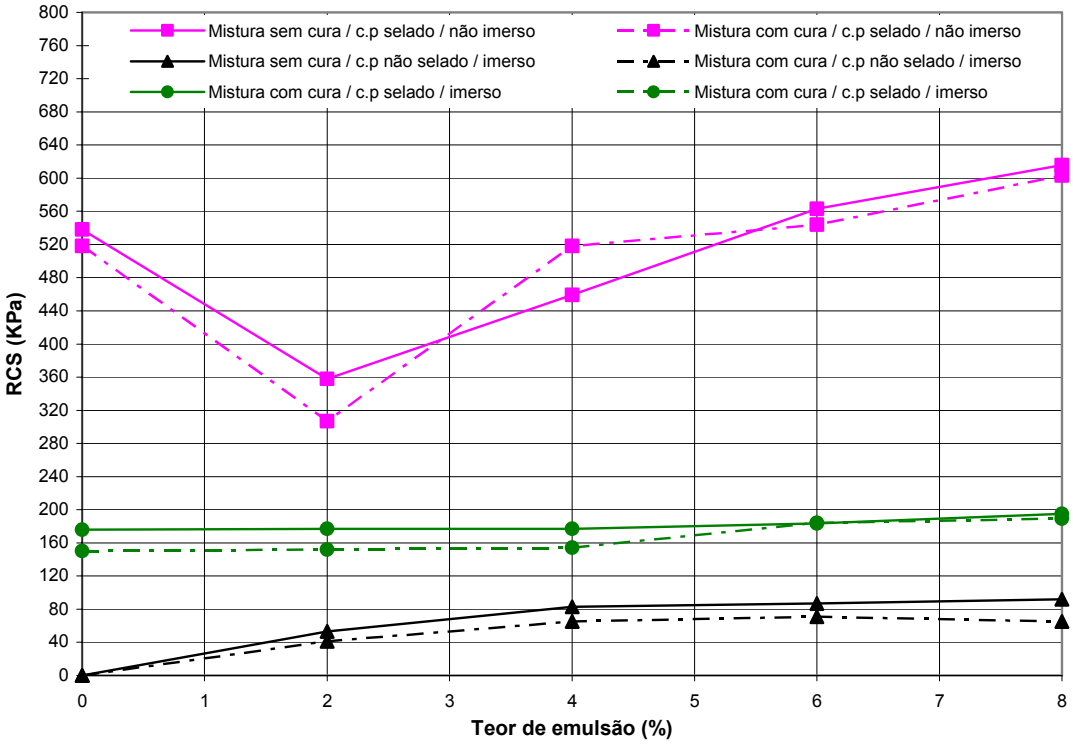


Figura 4.6b – Resistência à compressão simples das misturas solo-emulsão sem cura e com 24 horas de cura pré-compactação, para o solo argiloso *in natura* e com teores de 2, 4, 6 e 8% de emulsão em corpos-de-prova selados e não selados para a condição sem imersão e com imersão prévia em água pós-compactação .

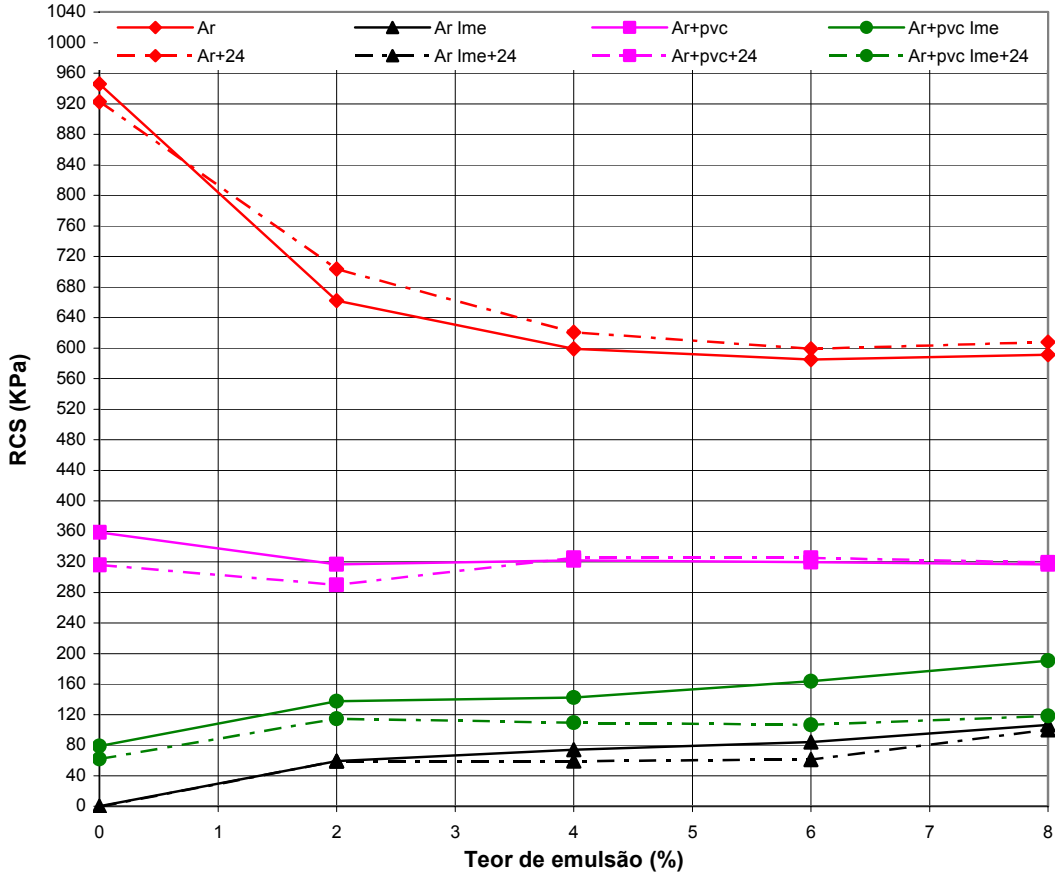


Figura 4.7 – Resistência à compressão simples das misturas solo-emulsão sem cura e com 24 horas de cura pré-compactação, para o solo arenoso *in natura* e com teores de 2, 4, 6 e 8% de emulsão em corpos-de-prova selados e não selados para a condição sem imersão e com imersão prévia em água pós-compactação.

Analisando-se as ilustrações das variações da RCS com o teor de emulsão apresentadas nas Figuras 4.6a, 4.6b e 4.7, observa-se que para as misturas de ambos os solos estudados (LA' e LG'), o efeito das 24 horas de cura pré-compactação das mesmas conduz em geral, a valores inferiores de RCS quando comparados com os valores das misturas não curadas, sendo este decréscimo de resistência observado para todas as misturas onde os corpos-de-prova foram imersos em água. Entretanto, os corpos-de-prova que não foram imersos em água não apresentam um padrão definido como o apresentado na condição anterior, já que dependendo do teor de emulsão para

uma mesma condição, observam-se valores inferiores e superiores de RCS. Para os corpos-de-prova que foram imersos em água observou-se também que quando os solos *in natura* têm um acréscimo e aumento dos teores de emulsão, os valores de RCS aumentam para ambos os solos. Entretanto, para os solos que não foram imersos em água, o acréscimo e o aumento de emulsão produzem decréscimos nos valores de RCS.

Ainda neste estudo, observa-se que os corpos-de-prova curados ao ar e não imersos em água apresentaram valores elevados de RCS, provavelmente pelo efeito da secagem dos mesmos, entretanto estes valores decrescem ao aumentar e incrementar teores de emulsão em ambos os solos.

Finalmente, com base nestes resultados, decidiu-se que nas etapas subseqüentes, os corpos-de-prova a serem ensaiados serão compactados a partir de misturas não submetidas à cura prévia.

4.3.2.2 Efeito de condição de cura pós-compactação na resistências das misturas

Para determinar a melhor condição de cura dos solos *in natura* e das misturas compostas com teores de 2, 4, 6 e 8% de emulsão do tipo RL-1C dosada, foram realizados ensaios de compressão simples para corpos-de-prova curados durante 7 dias nas condições descritas no Capítulo 3, Materiais e Métodos, e resumida na Tabelas 4.5, e ensaiados após imersão em água de 4 horas, considerando esta como a situação mais crítica.

Tabela 4.5 – Condições de cura (pós-compactação) a que os corpos-de-prova foram submetidos.

Corpos-de-prova não selados e curados ao ar
Corpos-de-prova selados e curados ao ar
Corpos-de-prova selados e curados em câmera úmida

As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam as variações da resistência à compressão simples (RCS) com o teor de emulsão para os solos argiloso e arenoso, respectivamente, nas condições consideradas anteriormente.

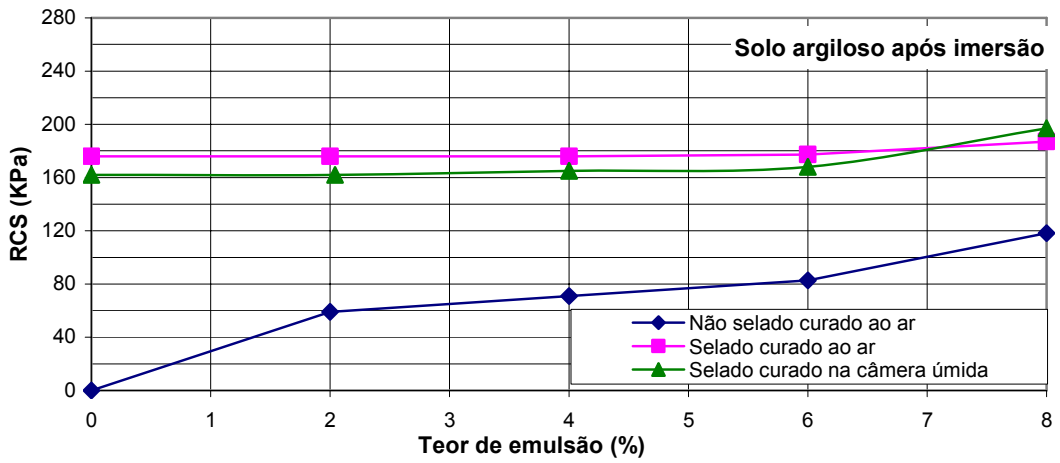


Figura 4.8 – Resistência à compressão simples para as misturas de solo-emulsão in natura e com teores de 2, 4, 6 e 8% de emulsão para o solo argiloso após 4 horas de imersão em água.

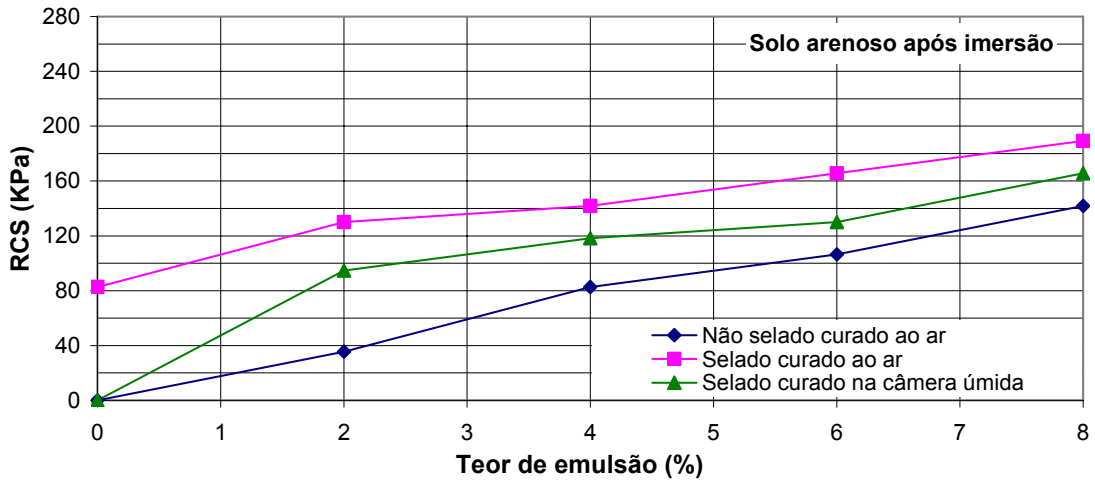


Figura 4.9 – Resistência à compressão simples para as misturas de solo-emulsão in natura e com teores de 2, 4, 6 e 8% de emulsão para o solo arenoso após 4 horas de imersão em água.

Analisando-se as Figuras 4.8 e 4.9 e tomando-se os valores de RCS após imersão em água como critério para a escolha da melhor condição de cura, observa-se para ambos os solos, que corpos-de-prova não selados e curados ao ar apresentaram os menores valores de RCS, sendo que para o solo *in natura,* ocorreu a desintegração dos mesmos, não permitindo a realização dos ensaios. Para corpos-de-prova selados e curados em câmera úmida, observou-se valores de RCS superiores aos observados para a condição discutida anteriormente, entretanto, inferiores às resistências correspondentes aos corpos-de-prova selados e curados ao ar.

Ainda para corpos-de-prova selados e curados em câmera úmida, observou-se que aqueles sem adição de emulsão desintegraram apenas para as misturas compostas com o solo arenoso. Finalmente, corpos-de-prova selados e curados ao ar apresentaram os maiores valores de RCS, sendo que nesta condição não ocorreu a desintegração para nenhuma das misturas. E ainda, observa-se que para o solo argiloso, corpos-de-prova ensaiados nesta condição apesar de apresentarem os maiores valores de RCS, estas não diferem significativamente daqueles obtidas para a condição analisada anteriormente. Para o solo arenoso, na média a RCS na condição selada com cura na câmera úmida é 77% do valor atingido na condição selada com cura ao ar.

Com base nestes resultados, decidiu-se que nas etapas subseqüentes da pesquisa, os corpos de prova a serem ensaiados serão previamente selados e curados ao ar, para condições com e sem imersão em água.

4.4 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

No presente estudo, foram realizados ensaios de compressão simples para a avaliação do comportamento das misturas de solo-emulsão pelo fato da resistência obtida neste ensaio ser o parâmetro mais utilizado com este propósito.

Os corpos-de-prova compactados para os ensaios de compressão simples foram aproveitados para também se avaliar o comportamento das misturas no tocante à expansão, contração e perda de umidade, considerando-se a influência do teor de emulsão, tempo de cura, condição de ensaio e tipo de solo, conforme procedimento descrito no Capitulo 3, Materiais e Métodos.

4.4.1 Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão

Conforme apresentado no Capítulo 3, Materiais e Métodos foram ensaiadas misturas compostas com os solos laterítico argiloso (LG') e laterítico arenoso (LA'), *in natura* e estabilizadas com 2, 4, 6 e 8% de emulsão.

As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam as resistências à compressão simples das misturas de solo-emulsão para as duas emulsões (dosada e convencional), os quatro tempos de cura (3, 7, 14 e 28 dias), as duas condições de ensaio (sem imersão e imerso) e os dois solos utilizados na

pesquisa (LA' e LG'). Cada valor apresentado é a média aritmética dos resultados do ensaio de 3 corpos-de-prova.

Tabela 4.6 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão (Emulsão dosada).

Tempo de cura	Solo	Teor de emulsão (%)	RCS (KPa) Sem imersão	RCS (KPa) Após imersão
3 dias	Argiloso LG'	0	508	95
		2	414	154
		4	449	177
		6	603	166
		8	686	154
	Arenoso LA'	0	367	0
		2	296	59
		4	284	59
		6	248	65
		8	189	95
7 dias	Argiloso LG'	0	539	177
		2	361	177
		4	461	177
		6	574	183
		8	615	183
	Arenoso LA'	0	355	0
		2	313	59
		4	325	59
		6	313	76
		8	319	118
14 dias	Argiloso LG'	0	710	166
		2	710	177
		4	733	225
		6	769	296
		8	922	426
	Arenoso LA'	0	769	95
		2	568	106
		4	509	112
		6	414	118
		8	349	130
28 dias	Argiloso LG'	0	1053	154
		2	757	213
		4	804	343
		6	993	449
		8	1100	497
	Arenoso LA'	0	1396	95
		2	556	106
		4	497	118
		6	390	177
		8	343	177

Tabela 4.7 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão (Emulsão convencional).

Tempo de cura	Solo	Teor de emulsão (%)	RCS (KPa) Após imersão
3 dias	Argiloso LG'	2	107
		4	130
		6	132
		8	137
	Arenoso LA'	2	0
		4	24
		6	51
		8	56
7 dias	Argiloso LG'	2	166
		4	176
		6	177
		8	179
	Arenoso LA'	2	0
		4	40
		6	56
		8	91
14 dias	Argiloso LG'	2	175
		4	219
		6	247
		8	251
	Arenoso LA'	2	72
		4	72
		6	103
		8	103
28 dias	Argiloso LG'	2	192
		4	249
		6	298
		8	300
	Arenoso LA'	2	94
		4	98
		6	127
		8	159

4.4.1.1 Solo arenoso

4.4.1.1.1 Influência do teor de emulsão

As Figuras 4.10 e 4.11 mostram respectivamente, a variação da resistência à compressão simples (RCS), para os corpos-de-prova ensaiados

sem imersão e após imersão prévia em água, em função do teor de emulsão e o tempo de cura para o solo arenoso usando a emulsão dosada.

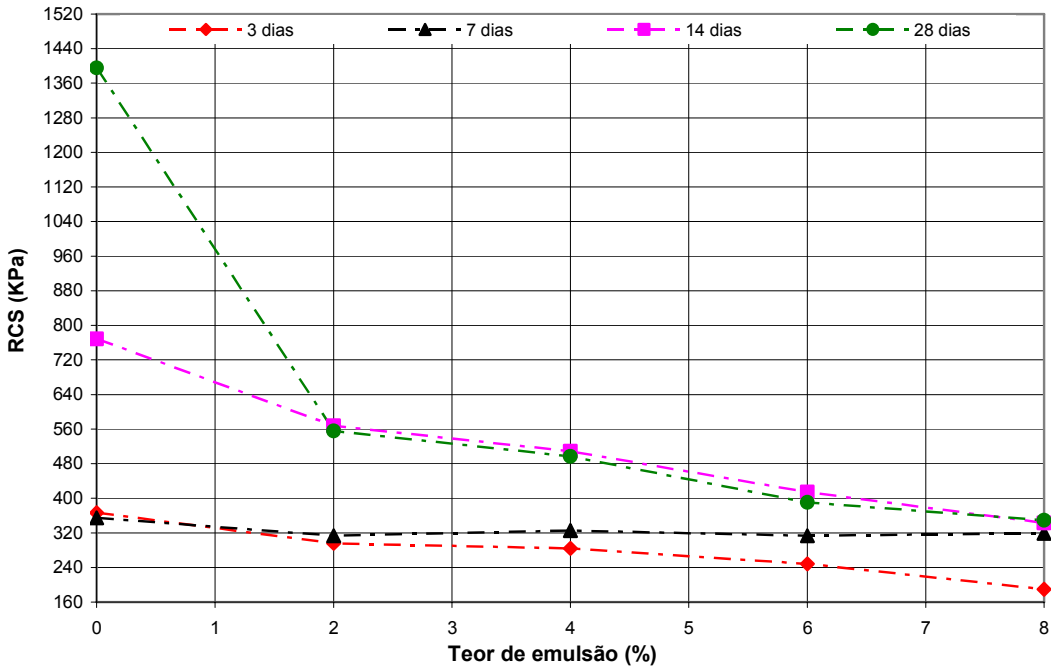


Figura 4.10 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo arenoso e a emulsão dosada para ensaios sem imersão em água

Analisando-se a Figura 4.10 e tomando-se os valores das RCS sem imersão em água da Tabela 4.6, observou-se a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão para o solo *in natura* e todos os teores de emulsão, onde para todos os tempos de cura houve decréscimos de RCS com a adição ou o aumento do teor de emulsão, sendo estes decréscimos maiores para os tempos de cura mais elevados. Comparando-se os valores de RCS do solo *in natura* para os diversos tempos de cura com as respectivas médias de RCS calculadas a partir dos teores de emulsão considerados, observa-se uma queda de resistência de 31%, 11%, 40% e 68%, respectivamente para 3, 7, 14 e 28 dias.

Estes resultados são semelhantes aos relatados por outros autores (Jacintho, 2005; Miceli, 2006; Soliz, 2007) que mostram que os desempenhos das misturas de solo-emulsão com solos de comportamento laterítico apresentam menores valores de RCS quando comparadas ao desempenho dos mesmos solos *in natura.* Entretanto, deve-se salientar que nesta pesquisa constatou-se que para a condição onde os corpos-de-prova foram imersos em água, a resistência das misturas de solo-emulsão com solos de comportamento laterítico passa a ser maior que a resistência com os mesmos solos *in natura*.

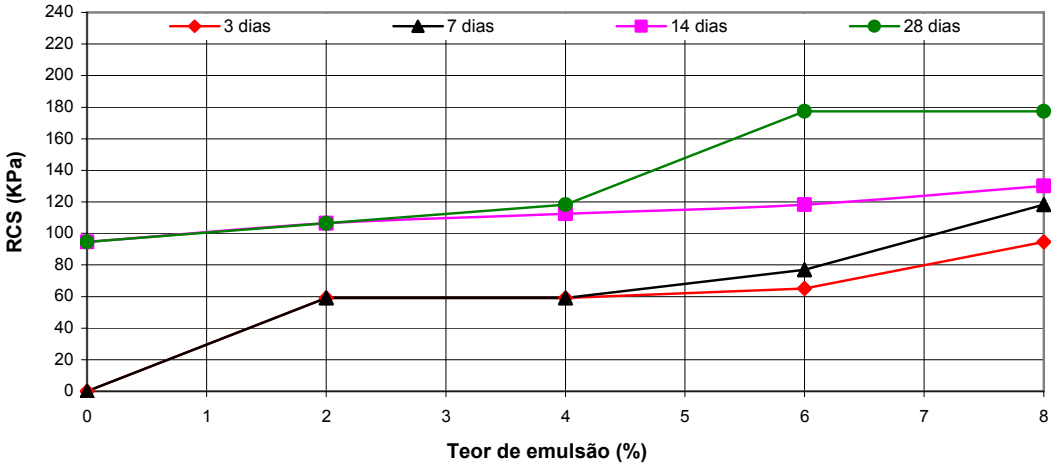


Figura 4.11 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo arenoso e a emulsão dosada para ensaios com imersão prévia em água

Analisando-se a Figura 4.11 e tomando-se os valores das RCS com imersão em água da Tabela 4.6, observou-se a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão para o solo *in natura* e todos os teores de emulsão, onde para todos os tempos de cura houve acréscimos de RCS com o acréscimo ou o aumento do teor de emulsão. Comparando-se os valores de RCS do solo *in natura* para os diversos tempos de cura com as respectivas

médias de RCS calculadas a partir dos teores de emulsão considerados, observa-se aumentos de resistência, estes aumentos para os primeiros tempos de cura vão de 0 até 70 e 78 kPa, respectivamente para 3 e 7 dias, para os tempos de cura seguintes, os aumentos são de 23% e 52%, respectivamente para 14 e 28 dias.

Observou-se que as misturas com 3 dias de cura apresentaram valores de RCS similares aos valores obtidos nas misturas com 7 dias de cura. Ainda nesta condição também se observou que, para o solo *in natura* curado por 3 e 7 dias, os corpos-de-prova se desintegraram ao serem imersos 4 horas em água.

Analisando-se os resultados obtidos para os ensaios em ambas as condições de ensaio, conclui-se que o efeito positivo da emulsão destaca-se apenas nos ensaios realizados após a imersão em água, sendo que neste caso o ganho de resistência cresce com o aumento do teor de emulsão e do tempo de cura. Para os ensaios sem imersão, a queda de RCS cresce com o teor de emulsão e com o tempo de cura.

A Figura 4.12 mostra a variação da resistência à compressão simples, para os corpos-de-prova ensaiados após imersão prévia em água, em função do teor de emulsão e o tempo de cura para o solo arenoso usando a emulsão convencional.

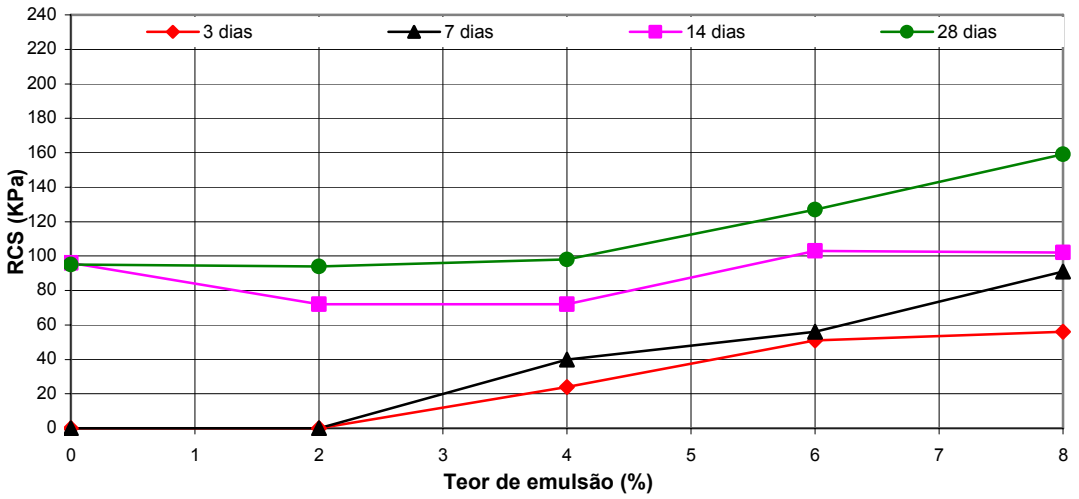


Figura 4.12 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo arenoso e a emulsão convencional para ensaios com imersão prévia em água

Analisando-se a Figura 4.12 e tomando-se os valores das RCS com imersão em água da Tabela 4.7, observou-se que o comportamento da variação da RCS repete o mesmo padrão já observado para as misturas com a emulsão dosada e ensaiadas na mesma condição, com exceção do tempo de cura de 14 dias, onde observou-se uma queda de resistência para os teores de 2 e 4% de emulsão.

Comparando-se os ganhos de resistência obtidos com a adição das emulsões dosada e convencional, observa-se que o efeito da primeira é maior que o da segunda. Tomando-se as resistências médias calculadas considerando os diversos teores de emulsão, tem-se que o ganho para emulsão dosada é 53%, 40%, 25% e 17% maior que da emulsão convencional, respectivamente para 3, 7, 14 e 28 dias.

4.4.1.1.2 Efeito do tempo de cura

A Figura 4.13 apresenta os valores da RCS, para os corpos-de-prova ensaiados sem imersão prévia em água, em função do tempo de cura e teor de emulsão para o solo arenoso usando a emulsão dosada.

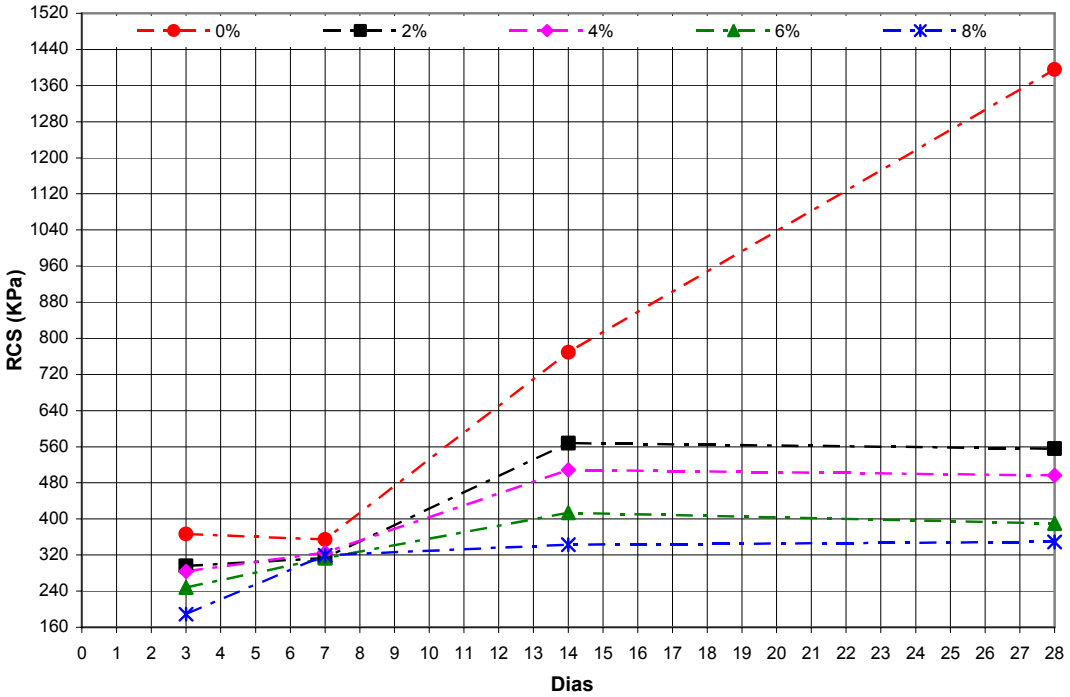


Figura 4.13 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo arenoso e a emulsão dosada para ensaios sem imersão em água

Analisando-se a Figura 4.13 e tomando-se os valores das RCS sem imersão em água da Tabela 4.6, observou-se a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão ao longo do tempo de cura. Para o solo *in natura*, a RCS cresce significativamente com o aumento do tempo de cura. Tomando-se os valores de resistência para 3 e 28 dias, observa-se que para 28 dias a resistência é 280% maior que a resistência obtida para 3 dias. As misturas com emulsão asfáltica apresentam o mesmo padrão observado para o solo *in natura*, mas os aumentos obtidos são pequenos comparados com os do solo *in*

natura. Observa-se que para 28 dias, esses aumentos são de 88, 75, 57 e 81% da resistência obtida para 3 dias, respectivamente para 2, 4, 6 e 8% de emulsão. Ainda neste caso, observa-se que o aumento destacado ocorre até os 14 dias, após os quais, a resistência mantém-se praticamente constante.

A Figura 4.14 mostra a variação da resistência à compressão simples, para os corpos-de-prova ensaiados após imersão prévia em água, em função do tempo de cura e teor de emulsão para o solo arenoso usando a emulsão dosada.

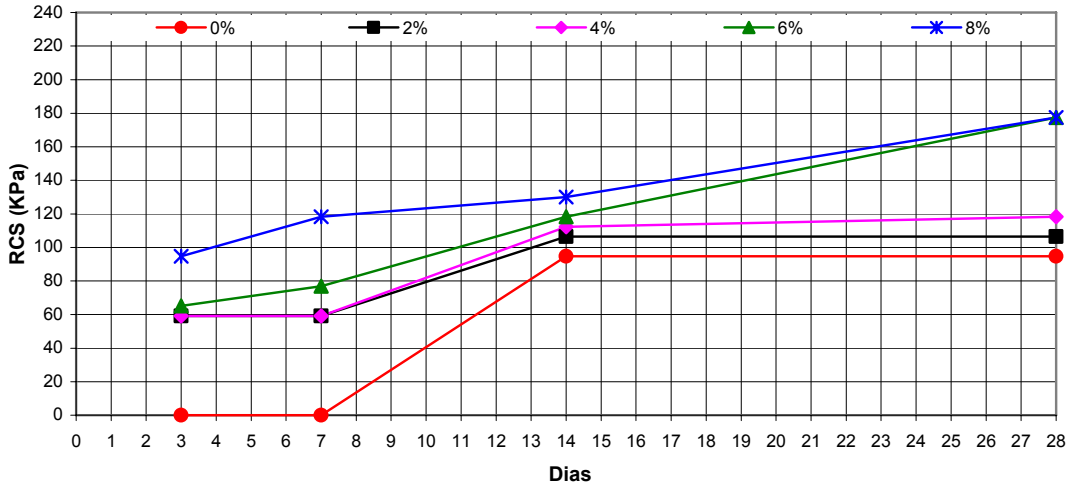


Figura 4.14 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão dosada para o solo arenoso para ensaios com imersão prévia em água.

Analisando-se a Figura 4.14 e tomando-se os valores das RCS após imersão em água da Tabela 4.6, observou-se a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão ao longo do tempo de cura. Para o intervalo de 3 a 7 dias de cura, observou-se que no solo *in natura* os corpos-de-prova desintegraram-se ao serem imersos em água. Destaca-se que para o solo in natura e as misturas com 2 e 4% de emulsão os valores de resistência se

mantêm constante, entretanto para as misturas com 6 e 8% de emulsão existem ganhos de resistência e estes crescem com o teor de emulsão.

Ainda nesta Figura, observou-se que para o intervalo de 7 a 14 dias de cura acontecem ganhos de resistência para o solo *in natura* e para todas as misturas com emulsão, sendo que a menos do teor de 8%, é neste intervalo que ocorrem os maiores ganhos com o tempo de cura. Para o intervalo de 14 a 28 dias de cura, observou-se que para o solo in natura e as misturas com 2 e 4% não existem ganhos de resistência, entretanto para as misturas com 6 e 8% continua ocorrendo o ganho de resistência.

A Figura 4.15 apresenta os valores da RCS, para os corpos-de-prova ensaiados com imersão prévia em água, em função do tempo de cura e teor de emulsão para o solo arenoso usando a emulsão convencional.

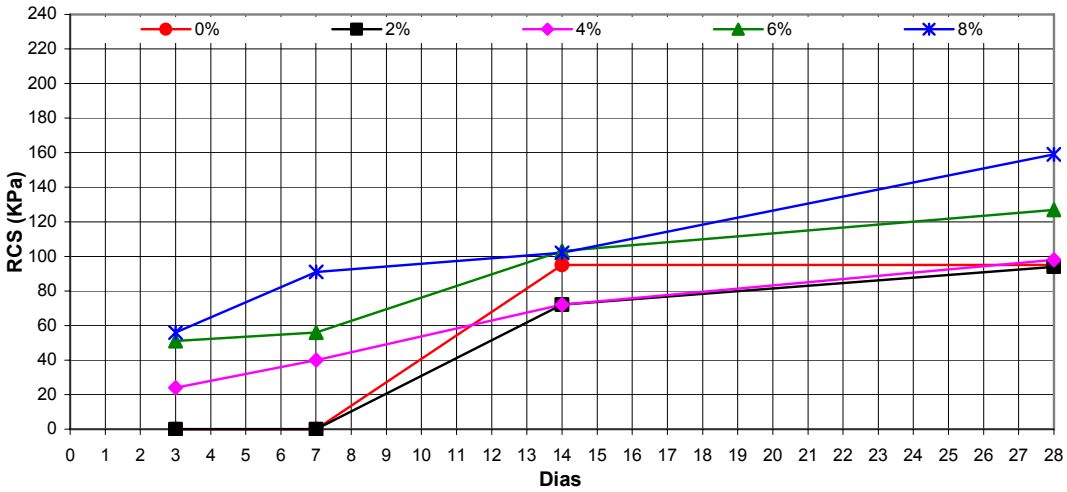


Figura 4.15 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão convencional para o solo arenoso para ensaios com imersão prévia em água.

Analisando-se a Figura 4.15 e tomando-se os valores das RCS após imersão em água da Tabela 4.7, observou-se que a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão ao longo do tempo de cura com emulsão convencional (Figura 4.15) é similar ao comportamento observado nas misturas com emulsão dosada (Figura 4.14) nos intervalos de cura de 3 a 7 dias para o solo *in natura* e os teores de 2, 6 2 8%, já no intervalo de cura de 7 a 14 dias o comportamento é similar em todas as misturas, entretanto no intervalo de 14 a 28 dias, observa-se que para os teores de 2 e 4% os valores de resistência continuam crescendo, situação que não acontece com as misturas com emulsão dosada.

Ainda nesta situação, observou-se que no intervalo de 3 a 7 dias de cura para o solo *in natura* e para a mistura com 2% de emulsão os corpos desintegraram-se após serem imersos em água. Também nesta situação destaca-se que para o intervalo de 14 a 28 dias de cura, os teores de 2 e 4% de emulsão apresentaram valores de resistência inferiores aos observados para o solo *in natura*.

4.4.1.2 Solo argiloso

4.4.1.2.1 Influência do teor de emulsão

As Figuras 4.16 e 4.17 mostram respectivamente, a variação da resistência à compressão simples, para os corpos-de-prova ensaiados sem imersão e após imersão prévia em água, em função do teor de emulsão e o tempo de cura para o solo argiloso usando emulsão dosada.

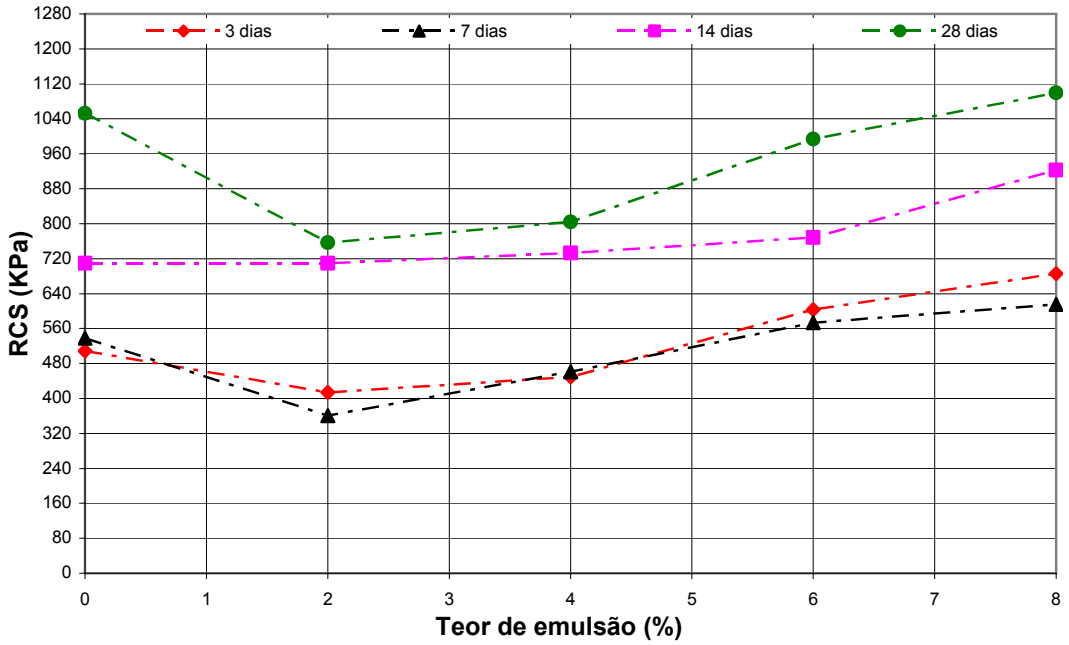


Figura 4.16 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios sem imersão em água.

Analisando-se a Figura 4.16 e tomando-se os valores das RCS sem imersão em água da Tabela 4.6, observou-se a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão para o solo *in natura* e todos os teores de emulsão, onde para os 3, 7 e 28 dias de cura houve perda de resistência com a adição de 2 e 4% de emulsão. Comparando-se os valores de RCS do solo *in natura* para os tempos de cura mencionados anteriormente com as respectivas médias de RCS calculadas a partir dos teores de emulsão considerados, a queda de resistência é de 15, 24 e 26%, respectivamente para 3, 7 e 28 dias.

Ainda nesta condição, observou-se que para o teor de 6% de emulsão acontece uma recuperação da resistência para todos os tempos de cura, já para 8% de emulsão observa-se aumentos de resistência para todos os tempos de cura. Comparando-se os valores de RCS do solo *in natura* para os todos os tempos de cura com as resistências obtidas com o teor de 8% de

emulsão, observa-se que o aumento de resistência é de 35,14, 30 e 4%, respectivamente para 3, 7, 14 e 28 dias.

Comparando-se os resultados obtidos nesta condição, observa-se que o solo argiloso apresenta um padrão onde as resistências sofrem uma queda para os teores de 2 e 4% de emulsão, entretanto para o teor de 6% as misturas tem uma recuperação de resistência, finalmente para o teor de 8% estes valores aumentam, diferente ao acontecido para o solo arenoso, onde a adição de emulsão somente produz perda de resistência. Estes padrões de comportamento diferem dos estudos realizados por Jacintho, 2005; Miceli, 2006 e Soliz, 2007, onde ao adicionar emulsão no solo argiloso a resistência deste cai, entretanto no solo arenoso a adição de emulsão provoca aumento nas resistências das misturas solo-emulsão.

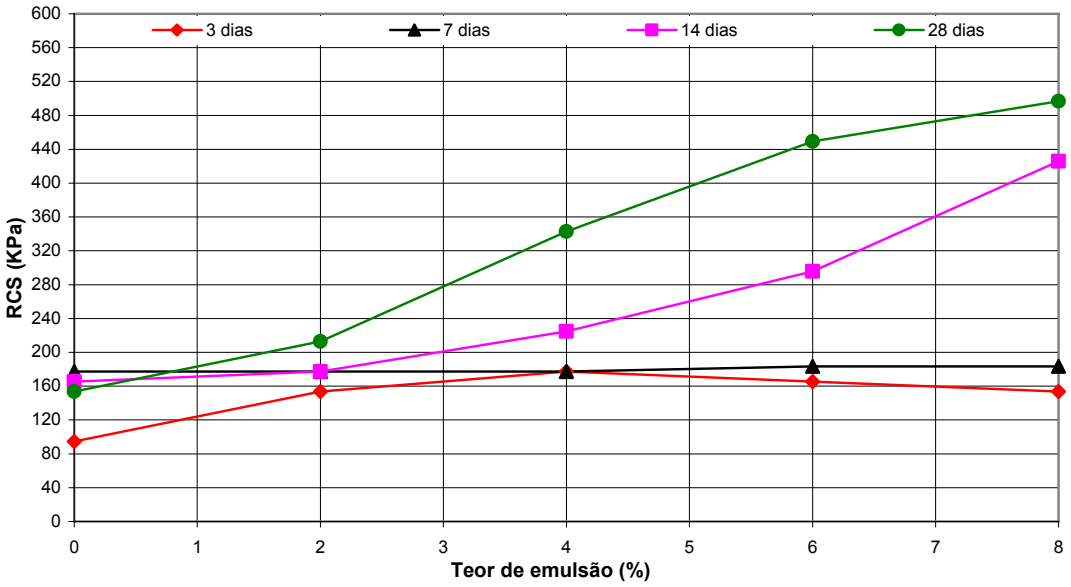


Figura 4.17 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios com imersão prévia em água.

Analisando-se a Figura 4.17 e tomando-se os valores das RCS com imersão em água da Tabela 4.6, observou-se a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão para o solo *in natura* e todos os teores de emulsão, onde para todos os tempos de cura houve aumento da RCS com o aumento do teor de emulsão. Comparando-se os valores de RCS do solo *in natura* para todos os tempos de cura com a mistura para 8% de emulsão, observou-se que os aumentos de resistência foram de 62, 3, 157 e 223%, respectivamente para 3, 7, 14 e 28 dias. Observou-se também que as misturas com 3 e 7 dias de cura apresentaram crescimentos de RCS menores aos obtidos nas misturas com 14 e 28 dias de cura.

Comparando-se os resultados obtidos nesta condição para as misturas com solos argilosos e arenosos, conclui-se que o efeito positivo da emulsão apresenta maior destaque para as misturas do solo argiloso quando curados durante 14 e 28 dias. Entretanto este destaque é mais significativo para as misturas com solo arenoso quando curados durante 3 e 7 dias, indicando que o solo argiloso exige um tempo maior para que o efeito da emulsão se concretize.

A Figura 4.18 apresenta os valores da RCS, para os corpos-de-prova ensaiados com imersão prévia em água, em função do tempo de cura e teor de emulsão para o solo argiloso usando a emulsão convencional.

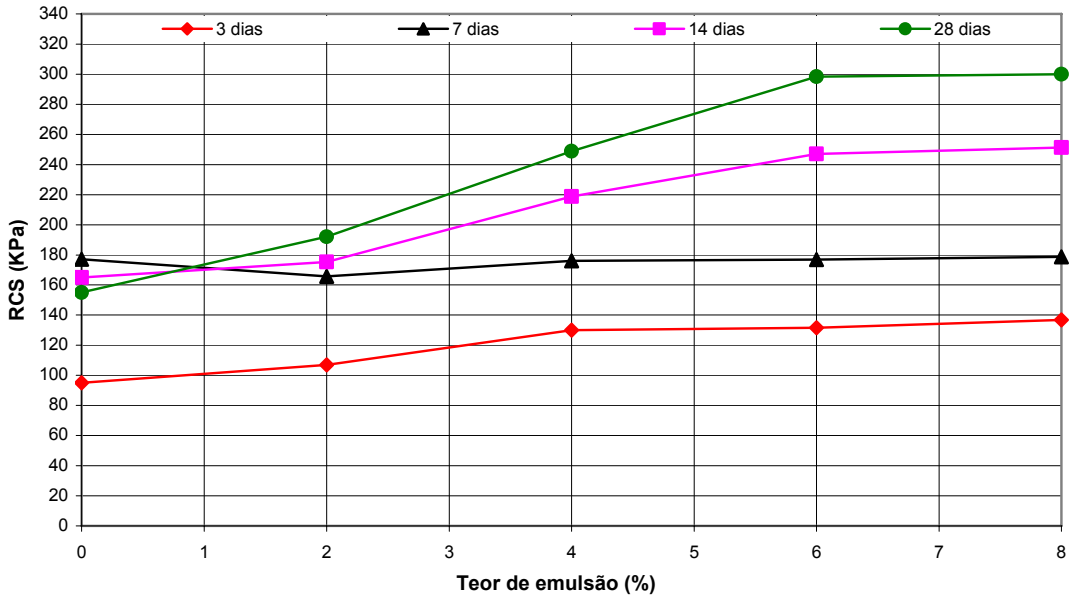


Figura 4.18 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo argiloso e a emulsão convencional para ensaios com imersão prévia em água.

Analisando-se a Figura 4.18 e tomando-se os valores das RCS com imersão em água da Tabela 4.7, observou-se que o comportamento da variação da RCS repete o mesmo padrão já observado para as misturas com a emulsão dosada e ensaiadas na mesma condição (Figura 4.7), com exceção do tempo de cura de 7 dias, onde observou-se uma queda de resistência para o teor de 2% e uma recuperação de resistência para os teores de 4, 6 e 8% de emulsão.

Comparando-se os ganhos de resistência obtidos com a adição das emulsões dosada e convencional, observa-se novamente que o efeito da primeira é maior que o da segunda. Tomando-se as resistências médias calculadas considerando todos os teores de emulsão, tem-se que o ganho para emulsão dosada é 22%, 3%, 21% e 31% maior que da emulsão convencional, respectivamente para 3, 7, 14 e 28 dias.

4.4.1.2.2 Efeito do tempo de cura

A Figura 4.19 apresenta os valores da RCS, para os corpos-de-prova ensaiados sem imersão prévia em água, em função do tempo de cura e teor de emulsão para o solo argiloso usando a emulsão dosada.

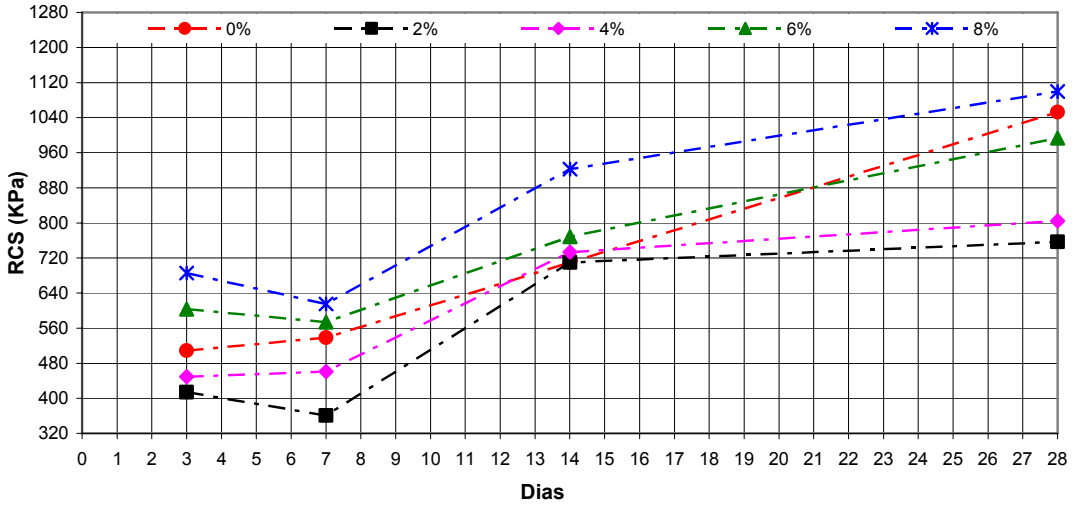


Figura 4.19 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios sem imersão em água.

Analisando-se a Figura 4.19 e tomando-se os valores das RCS sem imersão em água da Tabela 4.6, observou-se a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão ao longo do tempo de cura. Para o solo *in natura*, a RCS cresce significativamente com o aumento do tempo de cura. Tomando-se a média dos valores de resistência das misturas com emulsão no intervalo de 3 a 7 dias, observa-se que para 7 dias a resistência é 7% menor que a resistência obtida para 3 dias. Observa-se que para 14 e 28 dias, a resistência é 46 e 70% maior que a resistência obtida para 3 dias. Ainda nesta condição, observa-se que o aumento destacado ocorre no intervalo de 7 a 14 dias, após os quais, a resistência mantém-se constante para os teores de 2 e 4%, entretanto, para os teores de 6 e 8% o aumento de resistência continua.

Observou-se também, que o solo *in natura* apresentou maiores valores de RCS para todos os tempos de cura quando comparados com os valores de resistência das misturas com 2 e 4% de emulsão, já para a mistura com 6% de emulsão os valores de resistência são similares.

A Figura 4.20 mostra a variação da resistência à compressão simples, para os corpos-de-prova ensaiados após imersão prévia em água, em função do tempo de cura e teor de emulsão para o solo argiloso usando a emulsão dosada.

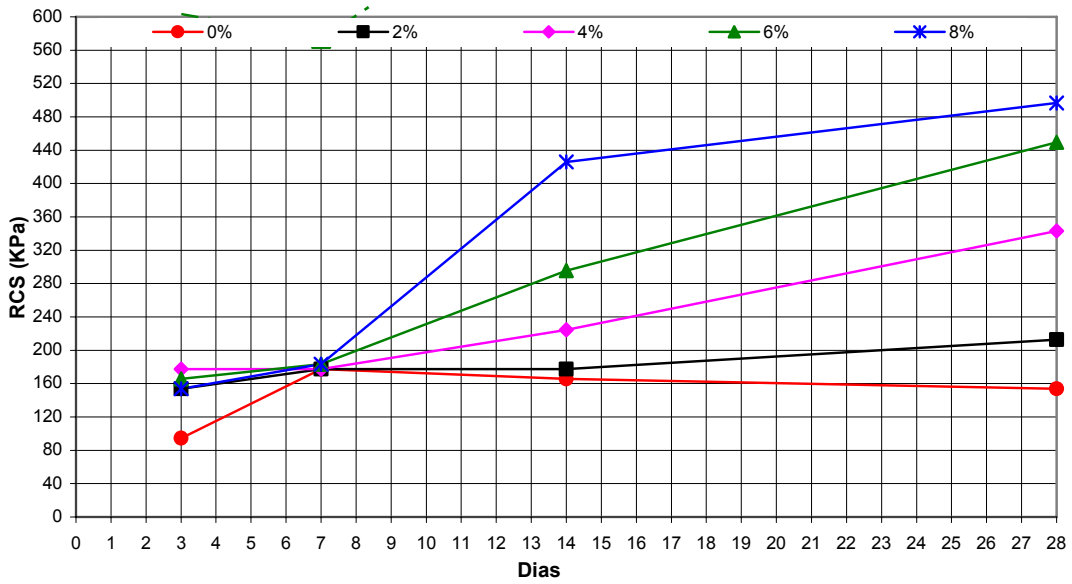


Figura 4.20 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios com imersão prévia em água.

Analisando-se a Figura 4.20 e tomando-se os valores das RCS após imersão em água da Tabela 4.6, observou-se a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão ao longo do tempo de cura. Para o intervalo de 3 a 7 dias de cura, observou-se que o solo *in natura* apresentou um aumento de resistência significativo, entretanto as misturas com emulsão apresentaram

crescimentos de resistência bem menores. Destaca-se que para o solo *in natura* e as misturas com emulsão para 7 dias de cura, estas atingiram valores de resistência bem próximos. Entretanto para as misturas com 6 e 8% de emulsão existem ganhos de resistência e estes crescem com o teor de emulsão.

Ainda nesta Figura, observou-se que para o intervalo de 7 a 14 dias de cura acontecem ganhos de resistência para o solo *in natura* e para todas as misturas com emulsão, é neste intervalo que ocorrem os maiores ganhos com o tempo de cura. Para o intervalo de 14 a 28 dias de cura, observou-se o mesmo padrão descrito anteriormente, entretanto os ganhos de resistência são menos significativos.

A Figura 4.21 apresenta os valores da RCS, para os corpos-de-prova ensaiados com imersão prévia em água, em função do tempo de cura e teor de emulsão para o solo argiloso usando a emulsão convencional.

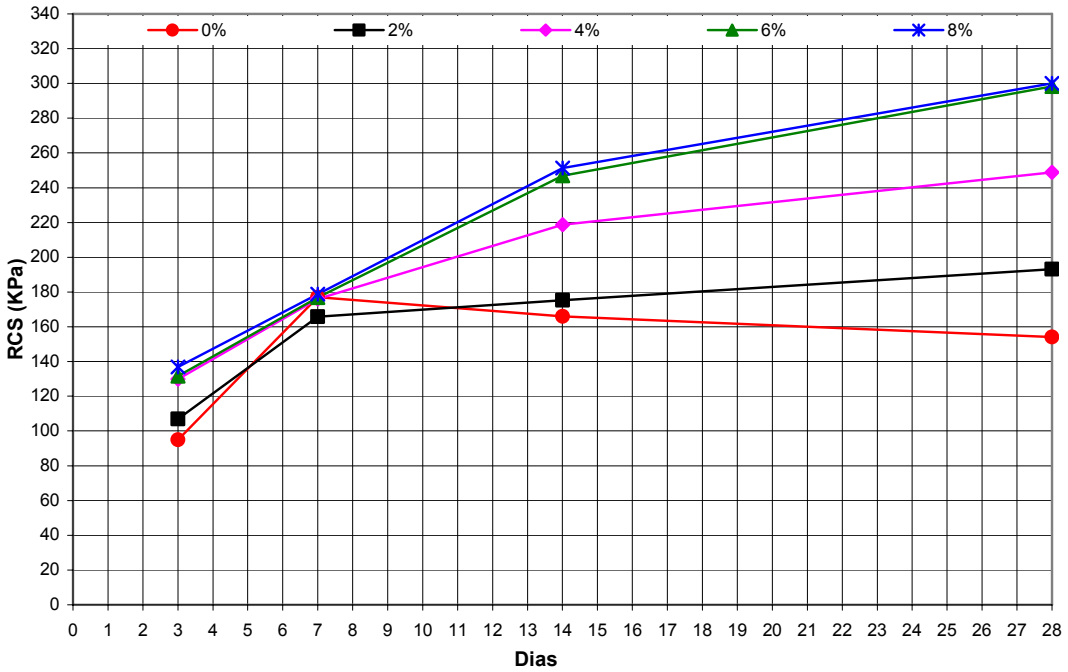


Figura 4.21 – Resistência à compressão simples das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo argiloso e a emulsão convencional para ensaios com imersão prévia em água.

Analisando-se a Figura 4.21 e tomando-se os valores das RCS após imersão em água da Tabela 4.7, observou-se que a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão ao longo do tempo de cura com emulsão convencional (Figura 4.21) é similar ao comportamento observado nas misturas com emulsão dosada (Figura 4.22) nos intervalos de cura de 7 a 14 dias para o solo *in natura* e os teores de 4, 6 e 8%, já no intervalo de 14 a 28 dias o comportamento é similar em todas as misturas, entretanto para o intervalo de 3 a 7 dias, observa-se que para todos os teores de emulsão os valores de resistência apresentam crescimentos significativos, situação que não acontece com as misturas com emulsão dosada.

Ainda nesta situação, observou-se que para os teores de 6 e 8% os valores de resistência apresentam valores similares para todos os tempos de

cura. Também nesta situação destaca-se que para o intervalo de 3 a 7 dias de cura observou-se os maiores ganhos de resistência.

4.5 ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados dos ensaios de compressão diametral forneceram subsídios para avaliar o comportamento das misturas de solo-emulsão no tocante à resistência à tração indireta, considerando-se a influência do teor de emulsão, tempo de cura, condição de ensaio e tipo de solo incorporado à mistura nesta variável.

4.5.1 Resistência à tração por compressão diametral das misturas de solo-emulsão

Conforme apresentado no Capítulo 3, Materiais e Métodos, foram ensaiadas misturas compostas com os solos arenoso e argiloso *in natura*, estabilizadas com 2, 4, 6 e 8% de emulsão e curadas 3, 7, 14 e 28 dias. As Tabelas 4.8 e 4.9 apresentam a resistência à tração indireta dos solos *in natura* e das misturas de solo-emulsão para as duas emulsões (dosada e convencional), os quatro tempos de cura (3, 7, 14 e 28 dias), as duas condições de ensaio (sem imersão e imerso) e os dois solos utilizados na pesquisa (LA' e LG'). Cada valor apresentado é a média aritmética dos resultados do ensaio de 3 corpos-de-prova.

Tabela 4.8 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão (Emulsão dosada).

Tempo de cura	Solo	Teor de emulsão (%)	RCD (KPa) Sem imersão	RCD (KPa) Após imersão
3 dias	Argiloso LG’	0	195	0
		2	198	12
		4	166	12
		6	142	24
		8	71	24
	Arenoso LA’	0	118	49
		2	142	59
		4	154	59
		6	154	59
		8	154	59
7 dias	Argiloso LG’	0	213	35
		2	213	35
		4	213	35
		6	166	35
		8	95	35
	Arenoso LA’	0	189	59
		2	237	65
		4	331	65
		6	331	65
		8	355	71
14 dias	Argiloso LG’	0	213	39
		2	237	47
		4	237	65
		6	242	65
		8	237	65
	Arenoso LA’	0	248	83
		2	272	87
		4	331	90
		6	355	90
		8	367	91
28 dias	Argiloso LG’	0	237	41
		2	260	73
		4	296	77
		6	296	95
		8	284	95
	Arenoso LA’	0	248	91
		2	284	98
		4	367	109
		6	367	129
		8	367	137

Tabela 4.9 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão (Emulsão convencional).

Tempo de cura	Solo	Teor de emulsão (%)	RCD (KPa) Após imersão
3 dias	Argiloso LG’	2	0
		4	6
		6	10
		8	15
	Arenoso LA’	2	59
		4	60
		6	60
		8	66
7 dias	Argiloso LG’	2	19
		4	26
		6	30
		8	30
	Arenoso LA’	2	59
		4	62
		6	62
		8	81
14 dias	Argiloso LG’	2	40
		4	52
		6	57
		8	57
	Arenoso LA’	2	77
		4	84
		6	85
		8	90
28 dias	Argiloso LG’	2	57
		4	63
		6	68
		8	79
	Arenoso LA’	2	124
		4	131
		6	134
		8	135

4.5.1.1 Solo arenoso

4.5.1.1.1 Influência do teor de emulsão

As Figuras 4.22 e 4.23 mostram respectivamente, a variação da resistência à compressão diametral (RCD), para os corpos-de-prova ensaiados sem imersão e após imersão prévia em água, em função do teor de emulsão e do tempo de cura para o solo arenoso usando emulsão dosada.

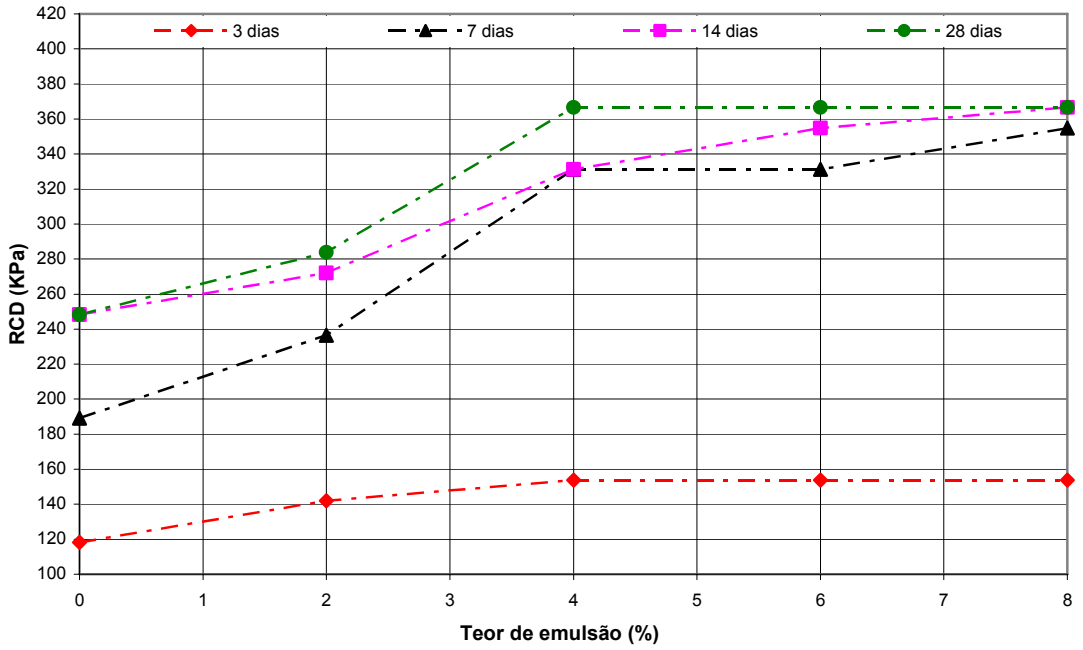


Figura 4.22 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo arenoso e a emulsão dosada para ensaios sem imersão em água.

Analisando-se a Figura 4.22 e tomando-se os valores das RCD sem imersão em água da Tabela 4.8, observou-se a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão para o solo *in natura* e todos os teores de emulsão, onde para todos os tempos de cura houve aumento das resistências com a adição ou o acréscimo do teor de emulsão, sendo estes aumentos maiores para os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias. Comparando-se os valores de RCD do solo *in natura* para os diversos tempos de cura com as respectivas médias de RCD calculadas a partir dos teores de emulsão considerados, observa-se um aumento de resistência de 31%, 88%, 48% e 48%, respectivamente para 3, 7, 14 e 28 dias. Ainda nesta condição, observou-se que as resistências obtidas para 3 dias de cura foram bem menores que as obtidas para 7, 14 e 28 dias.

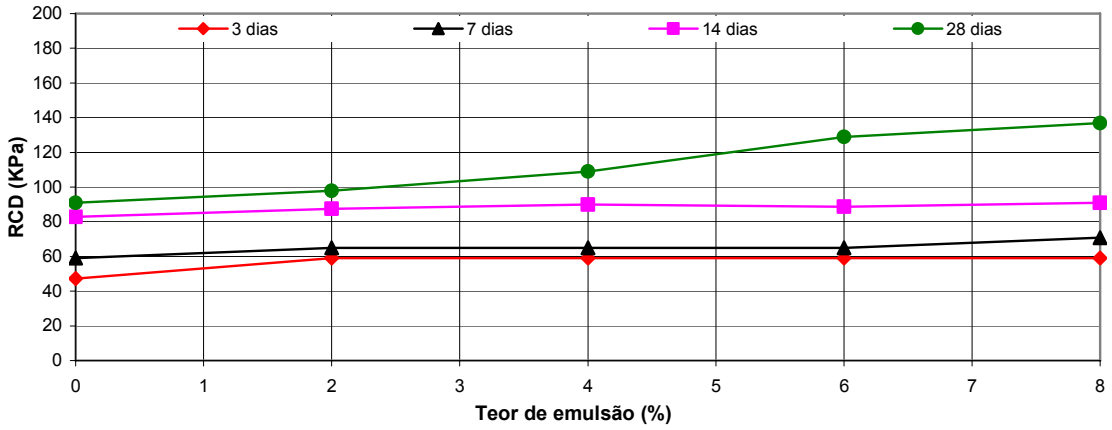


Figura 4.23 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo arenoso e a emulsão dosada para ensaios com imersão prévia em água.

Analisando-se a Figura 4.23 e tomando-se os valores das RCD com imersão em água da Tabela 4.8, observou-se a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão para o solo *in natura* e todos os teores de emulsão, onde para todos os tempos de cura houve acréscimos de resistência com o aumento do teor de emulsão. Comparando-se os valores de RCD do solo *in natura* para os diversos tempos de cura com as respectivas médias de RCD calculadas a partir dos teores de emulsão considerados, observam-se aumentos de resistência, sendo estes aumentos da ordem de 20, 13, 8 e 30%, respectivamente para 3, 7, 14 e 28 dias.

Observou-se que as misturas com 3 dias de cura apresentaram valores de RCD próximos aos obtidos nas misturas com 7 dias de cura. Ainda nesta condição também se observou, que para os 3, 7 e 14 dias de cura, as misturas com 2, 4, 6 e 8% de emulsão apresentam resistências constantes com o teor de emulsão.

Comparando-se os resultados obtidos para os ensaios em ambas as condições de ensaio, observou-se que o efeito positivo da emulsão destaca-se em ambas as condições para os tempos de cura mais elevados, sendo que o ganho de resistência cresce com o aumento do teor de emulsão e do tempo de cura.

A Figura 4.24 mostra a variação da resistência à compressão diametral, para os corpos-de-prova ensaiados após imersão prévia em água, em função do teor de emulsão e o tempo de cura para o solo arenoso usando a emulsão convencional.

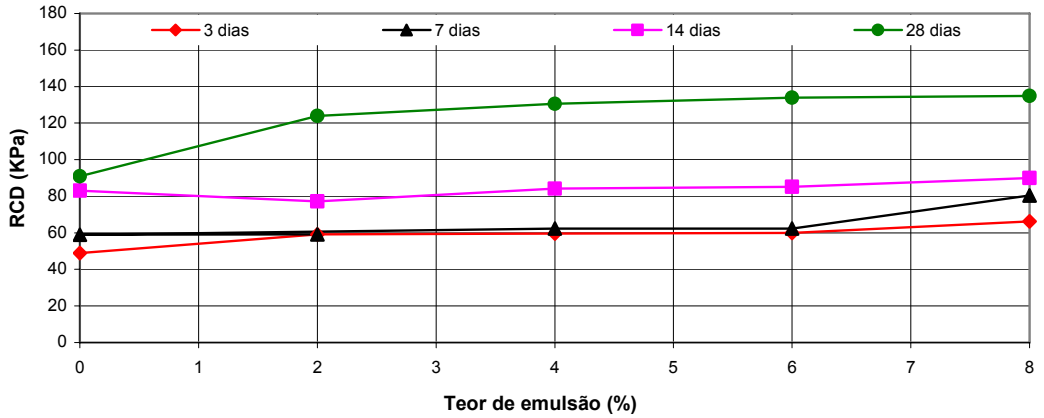


Figura 4.24 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo arenoso e a emulsão convencional para ensaios com imersão prévia em água.

Analisando-se a Figura 4.24 e tomando-se os valores das RCD com imersão em água da Tabela 4.9, observou-se que o comportamento da variação da RCD repete o mesmo padrão já observado para as misturas com a emulsão dosada e ensaiadas na mesma condição, com exceção do tempo de cura de 14 dias, onde observou-se uma queda de resistência para o teor de 2% de emulsão.

Comparando-se os ganhos de resistência obtidos com a adição das emulsões dosada e convencional, observa-se que o efeito em ambas é similar e que para os 28 dias de cura, as resistências para o maior teor são coincidentes, sendo que para os teores menores, o desempenho da emulsão convencional mostra-se um pouco superior a da emulsão dosada.

4.5.1.1.2 Efeito do tempo de cura

A Figura 4.25 apresenta os valores da RCD, para os corpos-de-prova ensaiados sem imersão prévia em água, em função do tempo de cura e teor de emulsão para o solo arenoso usando a emulsão dosada.

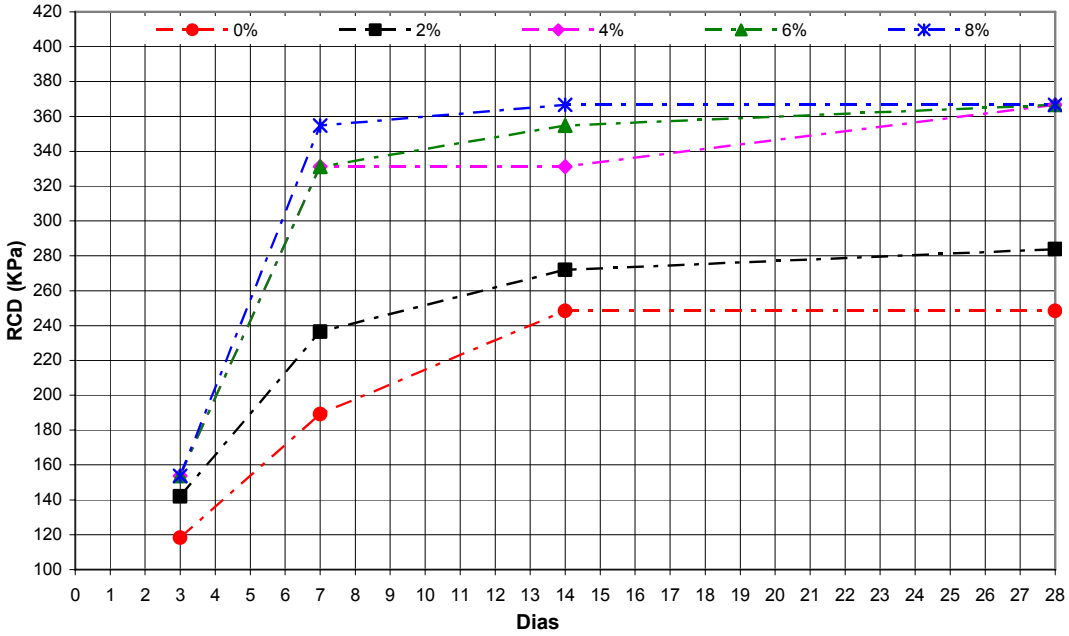


Figura 4.25 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo arenoso e a emulsão dosada para ensaios sem imersão prévia em água.

Analisando-se a Figura 4.25 e tomando-se os valores das RCD sem imersão em água da Tabela 4.8, observou-se a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão ao longo do tempo de cura. Para o solo *in natura* e

todas as misturas com emulsão, a RCD cresce significativamente com o aumento do tempo de cura. Tomando-se a média dos valores de resistência para 3 e 28 dias, observa-se que para 28 dias as resistências são 183% maior que as resistências obtidas para 3 dias. As misturas com emulsão asfáltica apresentam o mesmo padrão observado para o solo *in natura*, entretanto estas misturas apresentam resistências superiores. Observa-se que para 28 dias, esses aumentos são de 100, 138, 138 e 138% da resistência obtida para 3 dias, respectivamente para 2, 4, 6 e 8% de emulsão. Ainda neste caso, observa-se que o aumento destacado ocorre para os 14 dias, após os quais, a resistência apresenta uma tendência a se manter constante, excetuando o teor de 4%, que apresenta um aumento de resistência.

A Figura 4.26 mostra a variação da resistência à compressão diametral, para os corpos-de-prova ensaiados após imersão prévia em água, em função do tempo de cura e teor de emulsão para o solo arenoso usando a emulsão dosada.

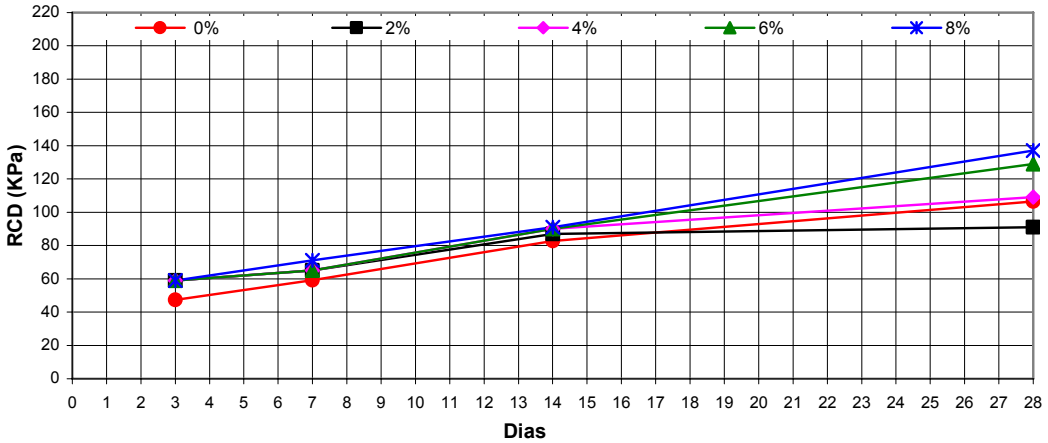


Figura 4.26 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo arenoso e a emulsão dosada para ensaios com imersão prévia em água.

Analisando-se a Figura 4.26 e tomando-se os valores das RCD após imersão em água da Tabela 4.8, observou-se a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão ao longo do tempo de cura. Observou-se que para todos os tempos de cura acontecem ganhos de resistência para o solo *in natura* e para todas as misturas com emulsão, sendo que no intervalo de 14 a 28 dias de cura acontecem os maiores ganhos de resistência. Tomando-se a média dos valores de resistência para 3 e 28 dias, observa-se que para 28 dias as resistências são 98% maior que a resistência obtida para 3 dias, valor da ordem da metade daquela observada nas mesmas condições para ensaios realizados sem imersão.

A Figura 4.27 apresenta os valores da RCD, para os corpos-de-prova ensaiados com imersão prévia em água, em função do tempo de cura e teor de emulsão para o solo arenoso usando a emulsão convencional.

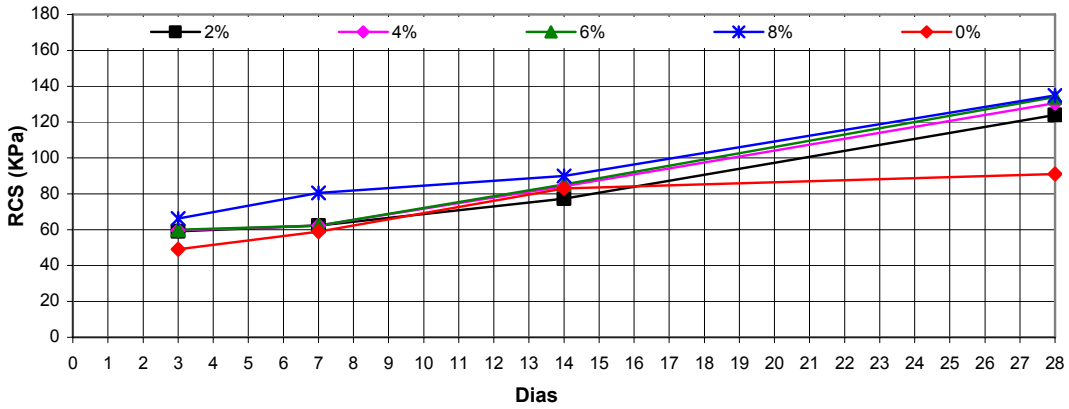


Figura 4.27 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo arenoso e a emulsão convencional para ensaios com imersão prévia em água.

Analisando-se a Figura 4.27 e tomando-se os valores das RCD após imersão em água da Tabela 4.9, observou-se que a evolução da resistência

das misturas de solo-emulsão ao longo do tempo de cura com emulsão convencional (Figura 4.27) é similar ao comportamento observado nas misturas com emulsão dosada (Figura 4.26) para todos os tempos de cura. Também nesta situação destaca-se que para 14 dias de cura, o teor de 2% de emulsão apresentou uma resistência inferior à observada para o solo *in natura*.

4.5.1.2 Solo argiloso

4.5.1.2.1 Influência do teor de emulsão

As Figuras 4.28 e 4.29 mostram respectivamente, a variação da resistência à compressão diametral, para os corpos-de-prova ensaiados sem imersão e após imersão prévia em água, em função do teor de emulsão e o tempo de cura para o solo argiloso usando emulsão dosada.

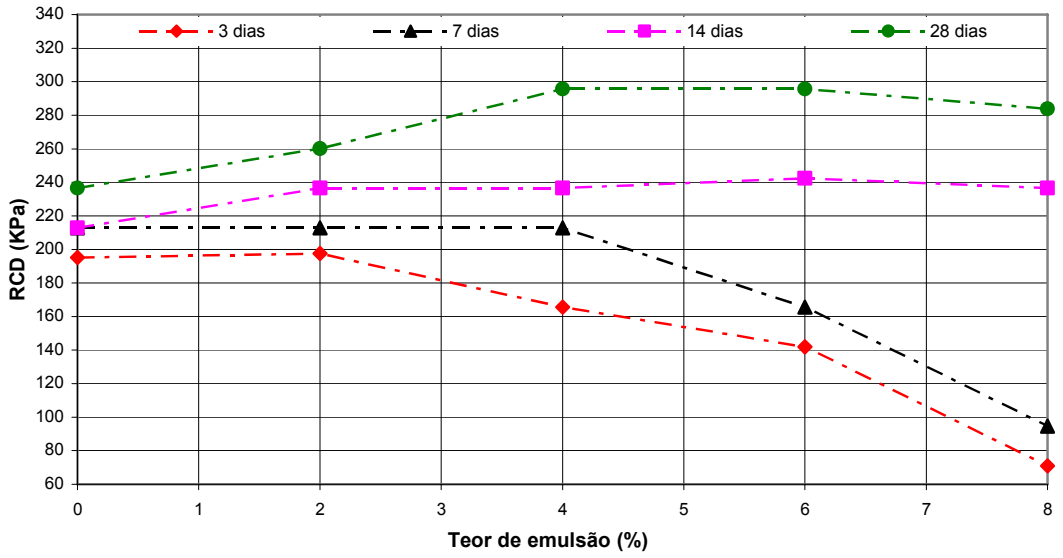


Figura 4.28 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios sem imersão em água.

Analisando-se a Figura 4.28 e tomando-se os valores das RCD sem imersão em água da Tabela 4.8, observou-se a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão para o solo *in natura* e todos os teores de emulsão,

onde para os 3 e 7 dias de cura houve queda das resistências com a adição ou o acréscimo do teor de emulsão, entretanto para os 14 e 28 dias de cura aconteceram aumentos das resistências com a adição de emulsão. Comparando-se os valores de RCD do solo *in natura* para os diversos tempos de cura com as respectivas médias de RCD calculadas a partir dos teores de emulsão considerados, observa-se uma queda de resistência de 64 e 55%, respectivamente para 3 e 7 e um aumento de resistência de 11 e 20%, respectivamente para 14 e 28 dias de cura. Ainda nesta condição, observou-se que as resistências obtidas para 14 e 28 dias atingiram os seus valores máximos para o teor de 4% de emulsão, destacou-se também que o solo *in natura* obteve valores elevados de resistências para todos os tempos de cura.

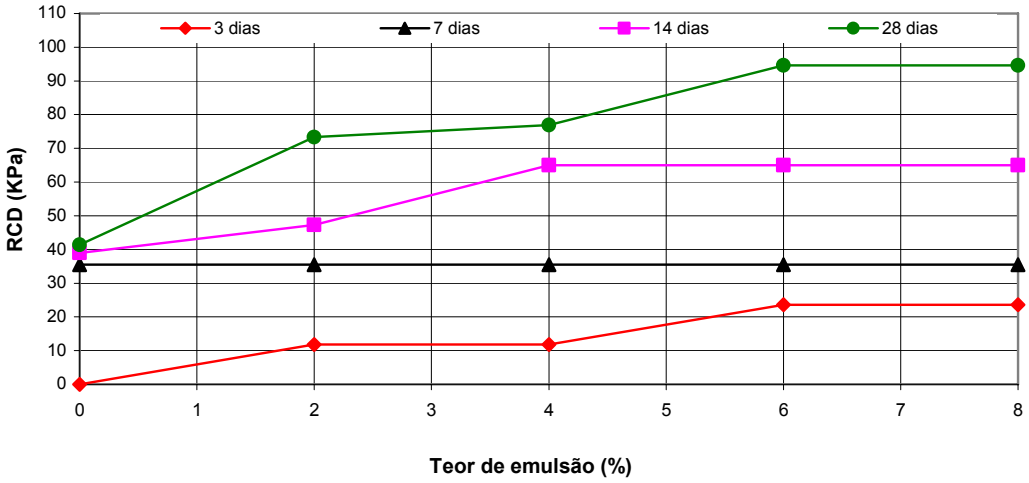


Figura 4.29 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios com imersão prévia em água.

Analisando-se a Figura 4.29 e tomando-se os valores das RCD com imersão em água da Tabela 4.8, observou-se a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão para o solo *in natura* e todos os teores de emulsão, onde excetuando os 7 dias de cura, todos os tempos de cura apresentam

acréscimos de resistência com o aumento do teor de emulsão. Comparando-se os valores de RCD do solo *in natura* para os diversos tempos de cura com as respectivas médias de RCD calculadas a partir dos teores de emulsão considerados, observam-se que para os 3 dias de cura ocorrem aumentos de resistência que vão de 0 até 24 kPa, para os 7 dias a resistência se mantém constante, já para os 14 e 28 dias os aumentos de resistência são da ordem de 67 e 88% respectivamente.

Observou-se que para o solo *in natura* curado por 3 dias, os corpos-de-prova desintegraram-se ao serem imersos em água, situação não esperada já que no solo arenoso não aconteceu desintegração de nenhum corpo-de-prova. Ainda nesta condição também se observou, que as maiores resistências foram observadas nas misturas com 6% de emulsão.

Analisando-se os resultados obtidos para os ensaios em ambas as condições de ensaio, observou-se que o efeito positivo da emulsão destaca-se em ambas as condições para os tempos de cura de 14 e 28 dias, sendo que o ganho de resistência cresce com o aumento do teor de emulsão.

A Figura 4.30 mostra a variação da resistência à compressão diametral, para os corpos-de-prova ensaiados após imersão prévia em água, em função do teor de emulsão e o tempo de cura para o solo argiloso usando a emulsão convencional.

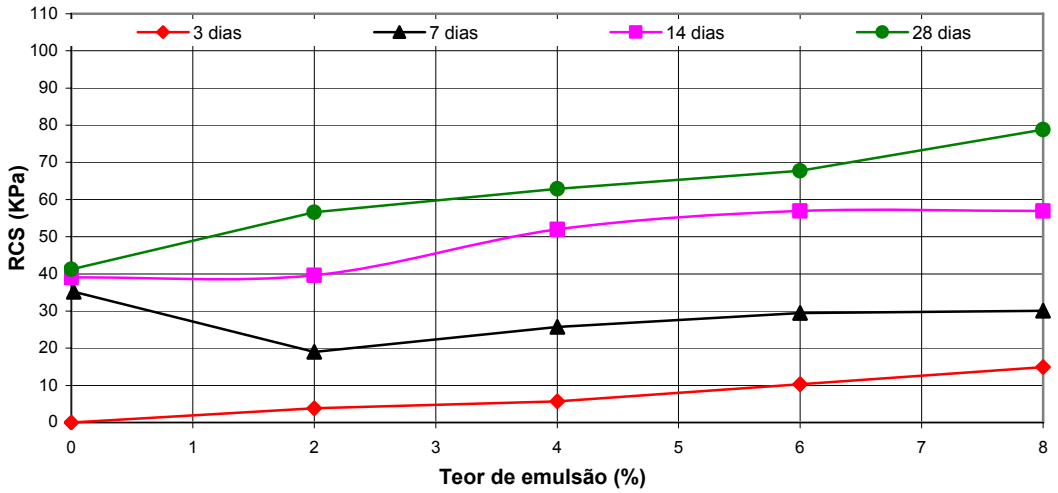


Figura 4.30 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do teor de emulsão, tempo de cura para o solo argiloso e a emulsão convencional para ensaios com imersão prévia em água.

Analisando-se a Figura 4.30 e tomando-se os valores das RCD com imersão em água da Tabela 4.9, observou-se que o comportamento da variação da RCD repete o mesmo padrão já observado para as misturas com a emulsão dosada (Figura 4.29) e ensaiadas na mesma condição, com exceção do tempo de cura de 7 dias, onde observou-se uma queda de resistência para o teor de 2% de emulsão.

Comparando-se os ganhos de resistência obtidos com a adição das emulsões dosada e convencional, observa-se que o ganho é mais significativo para as misturas com emulsão dosada, sendo que estas apresentam maiores valores de resistência para todos os tempos de cura. Também se esperava que na condição com imersão em água, o solo argiloso *in natura* tivesse um comportamento melhor que o do solo arenoso, entretanto, para ambas as emulsões, os corpos-de-prova com solo argiloso desintegraram-se ao serem

imersos em água, já para o solo arenoso os corpos-de-prova mantiveram-se íntegros.

4.5.1.2.2 Efeito do tempo de cura

A Figura 4.31 apresenta os valores da RCD, para os corpos-de-prova ensaiados sem imersão prévia em água, em função do tempo de cura e teor de emulsão para o solo argiloso usando a emulsão dosada

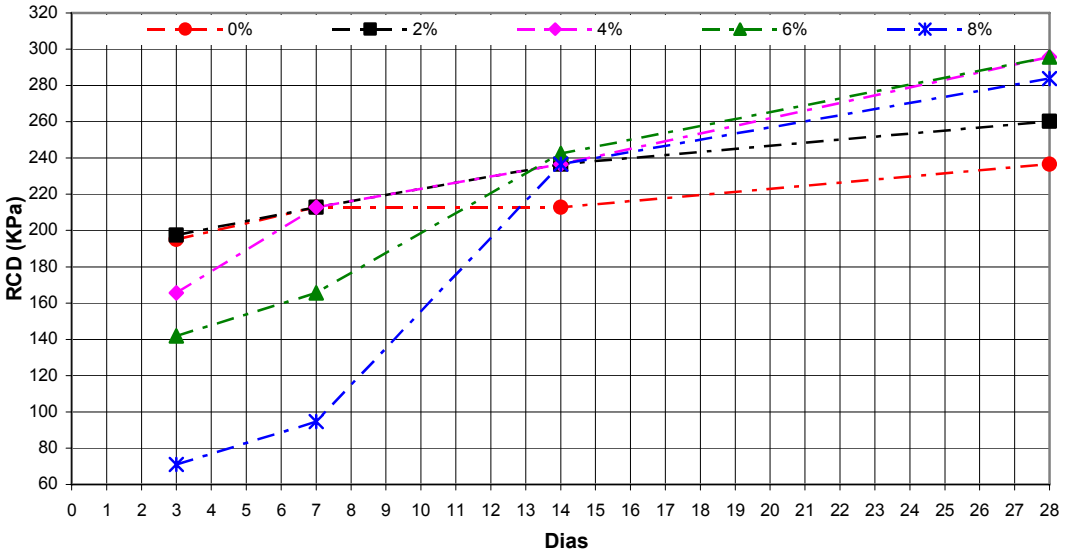


Figura 4.31 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios sem imersão em água.

Analisando-se a Figura 4.31 e tomando-se os valores das RCD sem imersão em água da Tabela 4.8, observou-se a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão ao longo do tempo de cura. Para o solo *in natura*, a RCD apresenta valores elevados para os 3 e 7 dias de cura quando comparados com as misturas com emulsão, entretanto para os 14 e 28 dias as resistências obtidas são menores que obtidas pelas misturas de solo-emulsão. Tomando-se os valores de resistência para 3 e 28 dias, observa-se que para 28 dias a resistência é 97% maior que a resistência obtida para 3 dias. As

misturas com emulsão asfáltica apresentam um padrão de incremento de resistência com o aumento dos tempos de cura, entretanto a adição de emulsão produz queda de resistências nas misturas. Observa-se que para 28 dias, esses aumentos são de 31, 78, 108 e 300% da resistência obtida para 3 dias, respectivamente para 2, 4, 6 e 8% de emulsão. Ainda neste caso, observa-se que o aumento destacado de resistência ocorre no intervalo de 7 a 14 dias de cura.

A Figura 4.32 mostra a variação da resistência à compressão diametral, para os corpos-de-prova ensaiados após imersão prévia em água, em função do tempo de cura e teor de emulsão para o solo argiloso usando a emulsão dosada.

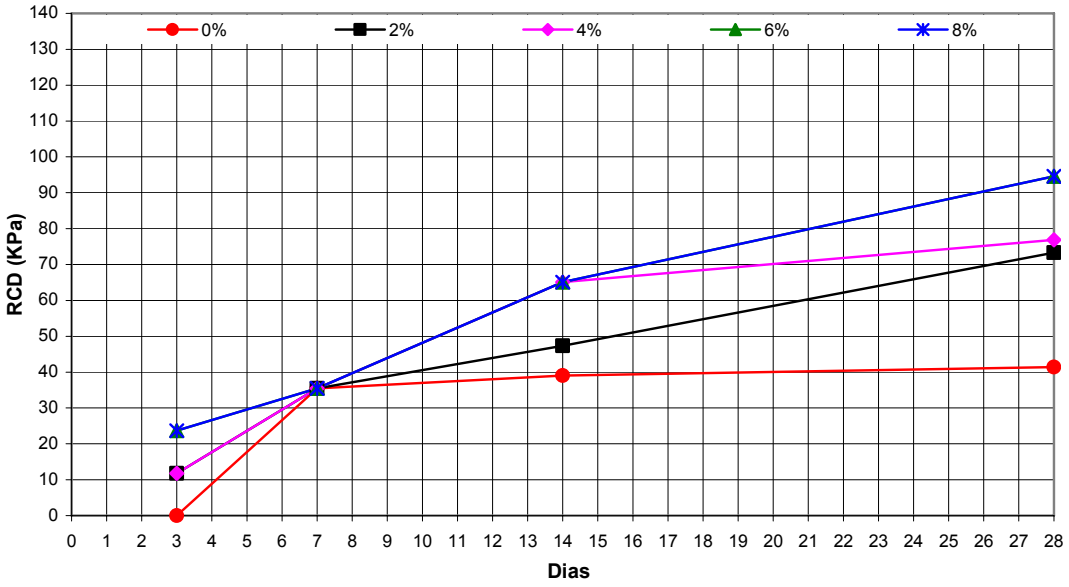


Figura 4.32 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo argiloso e a emulsão dosada para ensaios com imersão prévia em água.

Analisando-se a Figura 4.32 e tomando-se os valores das RCD após imersão em água da Tabela 4.8, observou-se a evolução da resistência das

misturas de solo-emulsão ao longo do tempo de cura. Observou-se que para todos os tempos de cura acontecem ganhos de resistência para o solo *in natura* e para todas as misturas com emulsão, sendo que no intervalo de 3 a 7 dias de cura acontecem os maiores ganhos resistência. Tomando-se a média dos valores de resistência para 3 e 28 dias, observa-se que para 28 dias as resistências são 372% maior que a resistência obtida para 3 dias. As misturas com emulsão asfáltica apresentam um padrão de crescimento mais significativo que o observado para o solo *in natura*.

A Figura 4.33 apresenta os valores da RCD, para os corpos-de-prova ensaiados com imersão prévia em água, em função do tempo de cura e teor de emulsão para o solo argiloso usando a emulsão convencional.

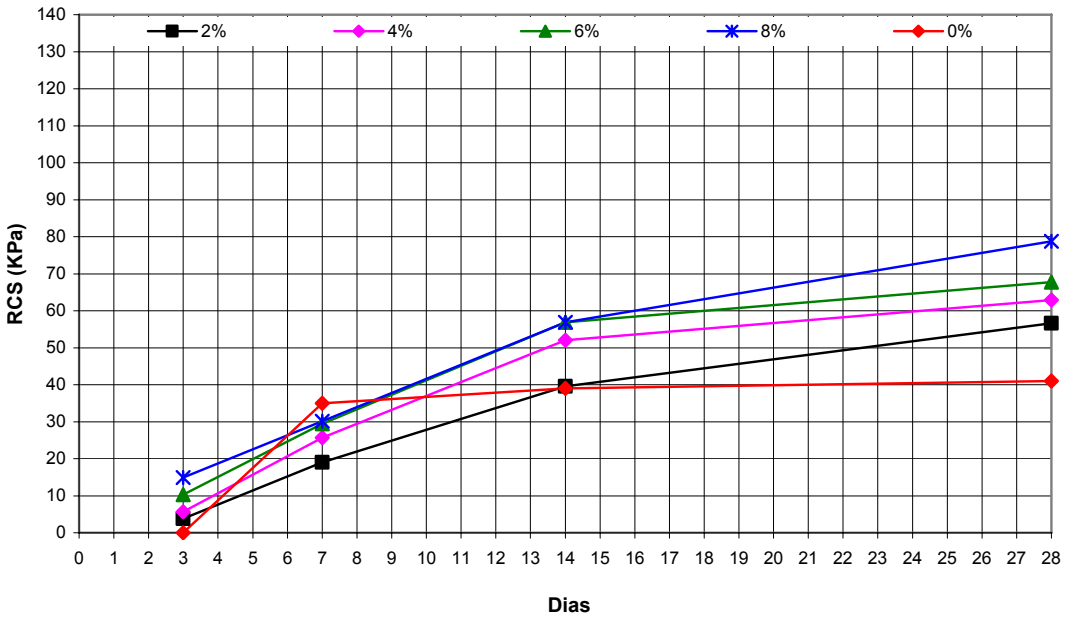


Figura 4.33 – Resistência à compressão diametral das misturas de solo-emulsão em função do tempo de cura, teor de emulsão para o solo argiloso e a emulsão convencional para ensaios com imersão prévia em água.

Analisando-se a Figura 4.33 e tomando-se os valores das RCD após imersão em água da Tabela 4.9, observou-se que a evolução da resistência das misturas de solo-emulsão ao longo do tempo de cura com emulsão convencional (Figura 4.33) é similar ao comportamento observado nas misturas com emulsão dosada (Figura 4.32) para todos os tempos de cura. Também nesta situação destaca-se que para 7 dias de cura, o solo in natura apresentou uma resistência superior à observada para as misturas com emulsão.

4.6 ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS

Os resultados dos ensaios triaxiais cíclicos forneceram subsídios para avaliar o comportamento das misturas de solo-emulsão através da análise do módulo de resiliência (M_R), considerando-se a influência, nesta variável, do teor e tipo de emulsão, tempo de cura, tipo de solo incorporado à mistura, além do estado de tensão.

4.6.1 Módulo de resiliência das misturas de solo-emulsão

Conforme apresentado no capítulo 3, Materiais e Métodos, foram ensaiados os solos *in natura* e as misturas de solo-emulsão estabilizadas com 2, 4, 6 e 8% de emulsão e curadas por 28 dias. Os ensaios triaxiais cíclicos foram realizados com e sem a imersão prévia dos corpos-de-prova em água. Deve-se destacar que foram analisados os resultados obtidos nos ensaios correspondentes aos corpos-de-prova com emulsões dosada e convencional (Tabela 4.10 e 4.11).

4.6.1.1 Modelagem do módulo de resiliência em função do estado de tensão

Para modelagem da variação do MR com o estado de tensão, foram utilizadas quatro relações, denominadas equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

$$MR = K_1 \sigma_d^{\ K_2} \qquad (4.1)$$

$$MR = K_1 \sigma_c^{\ K_2} \qquad (4.2)$$

$$MR = K_1 \sigma_d^{\ K_2} \sigma_c^{\ K_3} \qquad (4.3)$$

$$MR = K_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{K_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{K_3} \qquad (4.4)$$

onde:

MR: módulo de resiliência (MPa);

σ_d: tensão desvio (kPa);

σ_c: tensão confinante (kPa);

θ: primeiro invariante de tensão (kPa);

τ_{oct} : tensão cisalhante (kPa);

P_a : Pressão atmosférica;

K_1, K_2, K_3: parâmetros de regressão.

As Tabelas 4.10 e 4.11 mostram os valores dos parâmetros de regressão e os coeficientes de determinação R^2 para cada uma das relações analisadas, respectivamente.

Tabela 4.10 - Parâmetros de regressão e coeficientes de determinação para as equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, para corpos-de-prova com emulsão dosada.

	Modelo	Teor	Solo LA'				Solo LG'			
			K_1	K_2	K_3	R^2	K_1	K_2	K_3	R^2
Sem imersão	$M_R = K_1.\sigma_d^{K2}$	0	102	0,24	-	0,38	461	-0,09	-	0,38
		2	1423	-0,17	-	0,87	656	-0,17	-	0,96
		4	1030	-0,12	-	0,93	743	-0,19	-	0,98
		6	1412	-0,14	-	0,84	868	-0,08	-	0,84
		8	10291	-0,56	-	0,90	1354	-0,16	-	0,83
	$M_R = K_1.\sigma_c^{K2}$	0	97	0,26	-	0,91	282	0,02	-	0,02
		2	894	-0,07	-	0,15	502	-0,11	-	0,37
		4	882	-0,09	-	0,47	579	-0,14	-	0,54
		6	1033	-0,07	-	0,2	801	-0,07	-	0,73
		8	6667	-0,49	-	0,71	1126	-0,11	-	0,49
	$M_R = K_1.\sigma_c^{K2}\,\sigma d^{K3}$	0	110	0,29	-0,05	0,92	422	0,13	-0,19	0,95
		2	1333	0,07	-0,22	0,95	638	0,03	-0,18	0,97
		4	1007	0,03	-0,11	0,95	740	-0,01	-0,19	0,98
		6	1331	0,05	-0,17	0,89	881	-0,03	-0,06	0,91
		8	1489	0,02	-0,11	0,88	1366	-0,02	-0,14	0,95
	$M_R = K_1.p_a.(\theta/p_a)^{K2}.(\sigma_{oct}/p_a + 1)^{K}$	0	2225	0,35	-0,31	0,86	3373	0,02	-0,70	0,90
		2	8448	0,05	-0,84	0,83	3940	-0,00	-0,64	0,93
		4	6932	-0,01	-0,39	0,86	4067	-0,03	-0,56	0,95
		6	9224	0,01	-0,56	0,79	6651	-0,05	-0,17	0,93
		8	13200	-0,41	-1,01	0,97	8387	-0,08	-0,27	0,75
Com imersão	$M_R = K_1.\sigma_d^{K2}$	0	-	-	-	-	80	0,11	-	0,06
		2	38	0,29	-	0,34	355	-0,19	-	0,26
		4	57	0,28	-	0,13	307	-0,10	-	0,29
		6	73	0,24	-	0,11	415	-0,12	-	0,56
		8	149	0,11	-	0,03	720	-0,18	-	0,90
	$M_R = K_1.\sigma_c^{K2}$	0	-	-	-	-	31	0,36	-	0,71
		2	27	0,40	-	0,93	87	0,13	-	0,28
		4	22	0,54	-	0,91	178	0,02	-	0,02
		6	23	0,53	-	0,95	245	0,00	-	0,16
		8	20	0,57	-	0,93	445	-0,08	-	0,23
	$M_R = K_1.\sigma_c^{K2}\,\sigma d^{K3}$	0	-	-	-	-	51	0,53	-0,28	0,91
		2	38	0,52	-0,19	0,99	254	0,23	-0,33	0,95
		4	40	0,64	-0,24	0,97	284	0,21	-0,27	0,91
		6	34	0,58	-0,14	0,98	388	0,11	-0,19	0,96
		8	31	0,62	-0,14	0,97	706	0,02	-0,19	0,92
	$M_R = K_1.p_a.(\theta/p_a)^{K2}.(\sigma_{oct}/p_a + 1)^{K}$	0	-	-	-	-	1117	0,73	-1,51	0,91
		2	1062	0,68	-1,14	0,97	1706	0,31	-1,26	0,94
		4	1490	0,87	-1,75	0,96	2327	0,20	-1,05	0,63
		6	1399	0,80	-1,33	0,96	2856	0,29	-1,02	0,86
		8	1272	0,88	-1,08	0,96	3997	0,01	-0,68	0,93

Tabela 4.11 - Parâmetros de regressão e coeficientes de determinação para as equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, para corpos-de-prova com emulsão convencional.

	Modelo	Teor	Solo LA'				Solo LG'			
			K_1	K_2	K_3	R^2	K_1	K_2	K_3	R^2
Sem imersão	$M_R = K_1.\sigma_d^{K2}$	0	102	0,239	-	0,38	461	-0,09	-	0,38
		2	1181	-0,16	-	0,95	610	-0,02	-	0,62
		4	1413	-0,18	-	0,80	768	-0,16	-	0,87
		6	1423	-0,17	-	0,87	955	-0,07	-	0,18
		8	2026	-0,26	-	0,59	1369	-0,01	-	0,36
	$M_R = K_1.\sigma_c^{K2}$	0	97	0,263	-	0,91	282	0,019	-	0,02
		2	789	-0,08	-	0,32	432	-0,03	-	0,03
		4	805	-0,05	-	0,08	644	-0,13	-	0,48
		6	894	-0,07	-	0,15	573	0,044	-	0,12
		8	885	-0,08	-	0,08	1139	0,10	-	0,37
	$M_R = K_1.\sigma_c^{K2}\ \sigma d^{K3}$	0	110	0,29	-0,05	0,92	422	0,128	-0,19	0,95
		2	1181	0,00	-0,27	0,95	545	0,10	-0,17	0,87
		4	1303	0,089	-0,25	0,94	765	-0,00	-0,16	0,87
		6	1333	0,069	-0,22	0,95	941	-0,15	-0,04	0,91
		8	1423	0,087	-0,17	0,92	1346	-0,15	-0,02	0,87
	$M_R = K_1.p_a.(\theta/p_a)^{K2}.(\sigma_{oct}/p_a + 1)^{K3}$	0	2225	0,354	-0,31	0,86	3373	0,016	-0,70	0,90
		2	6908	-0,03	-0,52	0,91	4507	0,128	-0,81	0,97
		4	8161	0,062	-0,95	0,78	4706	0,005	-0,60	0,92
		6	8448	0,046	-0,84	0,83	7510	0,188	-0,75	0,95
		8	8453	-0,01	-0,83	0,37	8683	0,122	-0,81	0,91
Com imersão	$M_R = K_1.\sigma_d^{K2}$	0	-	-	-	-	80	0,112	-	0,06
		2	22	0,263	-	0,45	105	0,043	-	0,03
		4	32	0,563	-	0,19	203	-0,02	-	0,01
		6	74	0,327	-	0,13	330	-0,08	-	0,09
		8	77	0,211	-	0,32	427	-0,09	-	0,07
	$M_R = K_1.\sigma_c^{K2}$	0	-	-	-	-	31	0,359	-	0,71
		2	12	0,805	-	0,96	62	0,177	-	0,61
		4	18	0,507	-	0,68	126	0,093	-	0,24
		6	28	0,725	-	0,95	137	0,126	-	0,36
		8	31	0,807	-	0,89	291	0,181	-	0,41
	$M_R = K_1.\sigma_c^{K2}\ \sigma d^{K3}$	0	-	-	-	-	51	0,532	-0,28	0,91
		2	11	0,15	-0,14	0,94	86	0,322	-0,21	0,96
		4	23	0,557	-0,30	0,89	182	0,294	-0,27	0,91
		6	52	0,392	-0,20	0,92	230	0,222	-0,22	0,89
		8	91	0,563	-0,37	0,90	445	0,01	-0,18	0,90
	$M_R = K_1.p_a.(\theta/p_a)^{K2}.(\sigma_{oct}/p_a + 1)^{K3}$	0	-	-	-	-	1117	0,731	-1,506	0,91
		2	836	0,913	-1,19	0,92	1279	0,379	-1,01	0,94
		4	1221	1,074	-0,96	0,91	1965	0,281	-0,91	0,50
		6	1598	0,90	-1,42	0,94	2450	0,292	-1,02	0,86
		8	1614	1,091	-1,62	0,90	2824	0,31	-1,10	0,88

Analisando-se, os valores dos coeficientes de regressão (R^2) e tomando-se estes valores como medidas de adaptação dos modelos para representar a variação do módulo de resiliência em função do estado de tensão para ambas as emulsões estudadas, observou-se de maneira geral que as expressões 4.3 e 4.4 mostram-se as mais satisfatórias para a

representação do módulo de resiliência, entretanto, das duas expressões, a 4.3 apresenta melhor desempenho. Portanto, devido a este fato e a tendência observada no Brasil de se privilegiar esta expressão, as análises seguintes foram efetuadas com base nela.

Analisando-se os solos *in natura,* observa-se que na condição sem imersão, o solo arenoso apresenta valores de K2 maiores que K3, esta situação era esperada, já que os solos arenosos são influenciados pela tensão confinante, já para o solo argiloso os valores de K3 são maiores que K2, confirmando o comportamento esperado, onde os solos argilosos são influenciados pela tensão desvio. Para a condição com imersão, os corpos-de-prova moldados com solo arenoso desintegraram-se quando imersos em água. Para o solo argiloso observou-se que os valores de K1 são pequenos e os valores de K2 e K3 são elevados, indicando que pequenas variações no estado de tensão podem influenciar muito a variação do módulo de resiliência.

Para as misturas com emulsão na condição sem imersão, observou-se que a adição de emulsão provoca decréscimos dos valores de K2 para ambos os solos e aumento de K3 para o solo arenoso, levando a mistura a apresentar um comportamento correspondente ao dos solos finos. Para a condição com imersão, observaram-se para o solo arenoso valores elevados de K2 e valores baixos de K3, mostrando que o solo arenoso é influenciado principalmente pela tensão confinante. Entretanto no solo argiloso, observaram-se

decréscimos nos valores de K2 e pouca variação dos valores de K3, sendo que os valores de K2 são menores que K3, este fato confirma que estas misturas são mais influenciadas pela tensão desvio.

4.6.1.2 Módulo de resiliência para uma estrutura de baixo volume de tráfego.

Com o objetivo de comparar as diversas misturas estudadas, calculou-se, a partir do modelo composto, o módulo de resiliência (MR) de cada uma delas para os níveis de tensões avaliados através do programa ELSYM 5, considerando-se o centro da camada de base para a estrutura de pavimento esquematizada na Figura 28.

Para a utilização do programa numérico, adotou-se um MR inicial e um processo iterativo até que o valor convergisse para o fornecido pelo modelo composto.

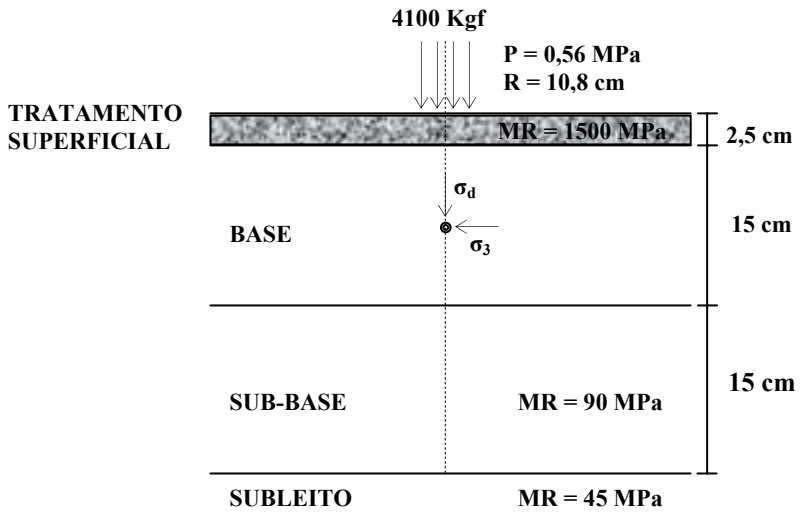


Figura 4.34 - Estrutura do pavimento flexível considerada na análise do MR.

A Tabela 4.12 apresenta os valores do módulo de resiliência calculado através do modelo composto para cada uma das misturas estudadas nas condições sem imersão e após imersão.

Tabela 4.12 - Modelo e valores do módulo de resiliência calculados para os modelos das misturas estudadas com emulsão dosada.

Material	Modelo	MR (MPa)
Solo argiloso puro sem imersão	$MR = 422\ \sigma_3^{0,128}\ \sigma_d^{-0,187}$	230
Solo argiloso + 2% emulsão sem imersão	$MR = 638\ \sigma_3^{0,025}\ \sigma_d^{-0,182}$	239
Solo argiloso + 4% emulsão sem imersão	$MR = 740\ \sigma_3^{-0,007}\ \sigma_d^{-0,192}$	246
Solo argiloso + 6% emulsão sem imersão	$MR = 881\ \sigma_3^{-0,032}\ \sigma_d^{-0,056}$	583
Solo argiloso + 8% emulsão sem imersão	$MR = 1366\ \sigma_3^{-0,016}\ \sigma_d^{-0,135}$	601
Solo argiloso puro com imersão	$MR = 51\ \sigma_3^{0,532}\ \sigma_d^{-0,275}$	39
Solo argiloso + 2% emulsão com imersão	$MR = 254\ \sigma_3^{0,233}\ \sigma_d^{-0,331}$	60
Solo argiloso + 4% emulsão com imersão	$MR = 284\ \sigma_3^{0,201}\ \sigma_d^{-0,27}$	146
Solo argiloso + 6% emulsão com imersão	$MR = 388\ \sigma_3^{0,102}\ \sigma_d^{-0,195}$	187
Solo argiloso + 8% emulsão com imersão	$MR = 706\ \sigma_3^{0,019}\ \sigma_d^{-0,196}$	239
Solo arenoso puro sem imersão	$MR = 110\ \sigma_3^{0,29}\ \sigma_d^{-0,054}$	240
Solo arenoso + 2% emulsão sem imersão	$MR = 1333\ \sigma_3^{0,069}\ \sigma_d^{-0,221}$	441
Solo arenoso + 4% emulsão sem imersão	$MR = 1007\ \sigma_3^{0,028}\ \sigma_d^{-0,144}$	473
Solo arenoso + 6% emulsão sem imersão	$MR = 1331\ \sigma_3^{0,047}\ \sigma_d^{-0,169}$	582
Solo arenoso + 8% emulsão sem imersão	$MR = 1489\ \sigma_3^{0,020}\ \sigma_d^{-0,107}$	869
Solo arenoso puro com imersão	---	---
Solo arenoso + 2% emulsão com imersão	$MR = 38\ \sigma_3^{0,521}\ \sigma_d^{-0,19}$	137
Solo arenoso + 4% emulsão com imersão	$MR = 40\ \sigma_3^{0,64}\ \sigma_d^{-0,237}$	188
Solo arenoso + 6% emulsão com imersão	$MR = 34\ \sigma_3^{0,581}\ \sigma_d^{-0,144}$	206
Solo arenoso + 8% emulsão com imersão	$MR = 31\ \sigma_3^{0,62}\ \sigma_d^{-0,137}$	228

A Figura 4.35 apresenta os valores do MR, para os corpos-de-prova ensaiados com e sem imersão prévia em água, em função do teor de emulsão para o solo argiloso usando a emulsão dosada.

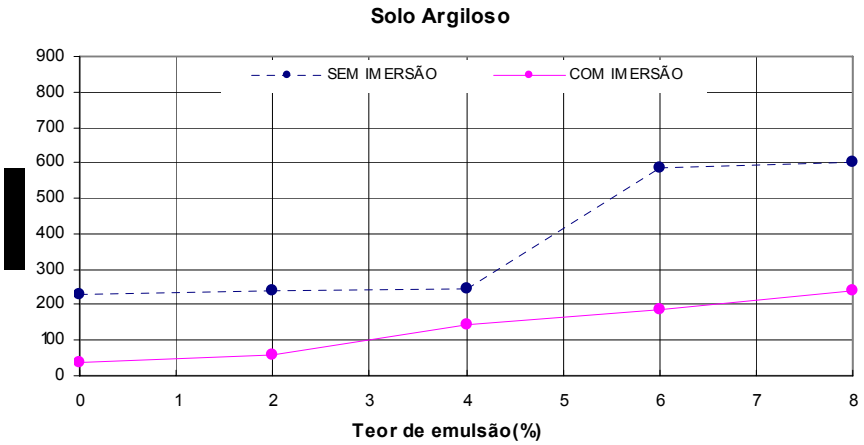


Figura 4.35 - Variação do MR do solo argiloso com o teor de emulsão dosada para 28 dias de cura sem e após imersão.

Analisando-se a Figura 4.35, observa-se que para o material argiloso ensaiado sem imersão, o módulo de resiliência varia pouco quando se adicionam 2% e 4% de emulsão ao solo *in natura,* sendo que esta variável apresenta um aumento expressivo para o teor de 6%, a partir do qual tem pouca variação. Observa-se que o efeito positivo da adição da emulsão ao solo argiloso destaca-se nos ganhos percentuais observados nos ensaios realizados após imersão em água. Para estes ensaios, o valor do MR é crescente com a adição e o aumento do teor de emulsão, para todos os teores considerados.

Comparando-se os resultados obtidos para o solo *in natura* com os resultados correspondentes aos teores de 6% e 8% que conduziram aos valores mais elevados de MR, observa-se que o valor do MR cresce respectivamente 153% e 161% para a condição sem imersão e para a condição após imersão, o crescimento é de, respectivamente 384% e 518%.

A Figura 4.36 apresenta os valores do MR, para os corpos-de-prova ensaiados com e sem imersão prévia em água, em função do teor de emulsão para o solo arenoso usando a emulsão dosada.

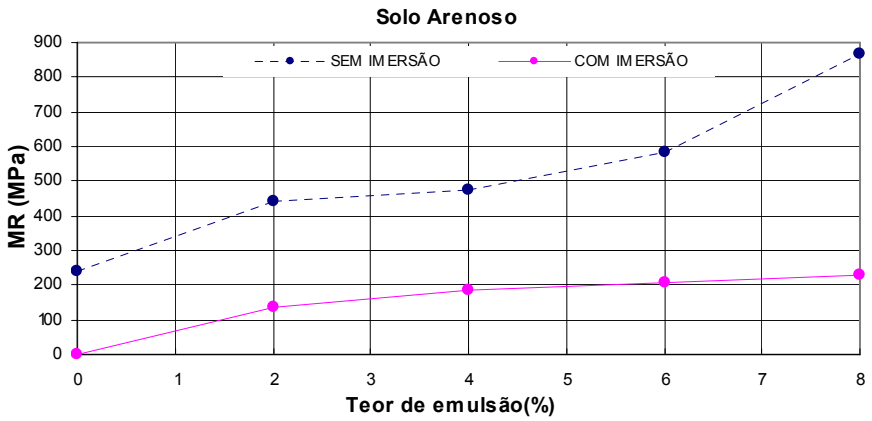


Figura 4.36 - Variação do MR do solo arenoso com o teor de emulsão dosada para 28 dias de cura sem e após imersão.

Analisando-se a Figura 4.36, observa-se para o material arenoso ensaiado sem imersão e após imersão, que o módulo de resiliência é crescente com a adição e o aumento do teor de emulsão asfáltica. Observa-se ainda que o efeito positivo da adição da emulsão ao solo arenoso tem maior destaque nos ensaios realizados sem imersão em água. Comparando-se os resultados obtidos para o solo *in natura* com os resultados correspondentes aos teores de 6% e 8% que conduziram aos valores mais elevados de MR, observa-se que o valor do MR cresce respectivamente 143% e 262% para a condição sem imersão. Para a condição após imersão não foi possível ensaiar o corpo-de-prova do solo *in natura* pela desintegração do mesmo, entretanto os resultados obtidos mostram incremento do valor do MR a partir do teor de 2%, já para os teores de 4%, 6% e 8%, o crescimento varia pouco.

Comparando-se o efeito da adição de emulsão asfáltica nos resultados dos ensaios de compressão triaxial cíclico das misturas constituídas com os solos argiloso e arenoso, observa-se que para o solo arenoso, o ganho de rigidez é maior.

A Tabela 4.13 apresenta os valores do módulo de resiliência calculado através do modelo composto para cada uma das misturas estudadas nas condições sem imersão e após imersão.

Tabela 4.13 - Modelo e valores do módulo de resiliência calculados para os modelos das misturas estudadas com emulsão convencional.

Material	Modelo	MR (MPa)
Solo argiloso puro sem imersão	$MR = 422.\sigma_3^{0,128}\sigma_d^{-0,187}$	230
Solo argiloso + 2% emulsão sem imersão	$MR = 545.\ \sigma_3^{0,100}\ \sigma_d^{-0,171}$	280
Solo argiloso + 4% emulsão sem imersão	$MR = 765.\ \sigma_3^{-0,004}\ \sigma_d^{-0,161}$	294
Solo argiloso + 6% emulsão sem imersão	$MR = 942.\ \sigma_3^{-0,148}\ \sigma_d^{-0,041}$	489
Solo argiloso + 8% emulsão sem imersão	$MR = 1346.\ \sigma_3^{-0,146}\ \sigma_d^{-0,022}$	782
Solo argiloso puro com imersão	$MR = 51.\ \sigma_3^{0,532}\ \sigma_d^{-0,275}$	39
Solo argiloso + 2% emulsão com imersão	$MR = 86.\ \sigma_3^{0,322}\ \sigma_d^{-0,210}$	52
Solo argiloso + 4% emulsão com imersão	$MR = 182.\ \sigma_3^{0,294}\ \sigma_d^{-0,265}$	146
Solo argiloso + 6% emulsão com imersão	$MR = 230.\ \sigma_3^{0,222}\ \sigma_d^{-0,224}$	151
Solo argiloso + 8% emulsão com imersão	$MR = 445.\ \sigma_3^{0,01}\ \sigma_d^{-0,183}$	158
Solo arenoso puro sem imersão	$MR = 110.\ \sigma_3^{0,29}\ \sigma_d^{-0,054}$	240
Solo arenoso + 2% emulsão sem imersão	$MR = 1181.\ \sigma_3^{0,000}\ \sigma_d^{-0,266}$	252
Solo arenoso + 4% emulsão sem imersão	$MR = 1303.\ \sigma_3^{0,089}\ \sigma_d^{-0,248}$	398
Solo arenoso + 6% emulsão sem imersão	$MR = 1333.\ \sigma_3^{0,069}\ \sigma_d^{-0,221}$	463
Solo arenoso + 8% emulsão sem imersão	$MR = 1423.\ \sigma_3^{0,087}\ \sigma_d^{-0,174}$	712
Solo arenoso puro com imersão	----------	-------
Solo arenoso + 2% emulsão com imersão	$MR = 11.\ \sigma_3^{0,15}\ \sigma_d^{-0,136}$	10
Solo arenoso + 4% emulsão com imersão	$MR = 23.\ \sigma_3^{0,557}\ \sigma_d^{-0,299}$	51
Solo arenoso + 6% emulsão com imersão	$MR = 52.\ \sigma_3^{0,392}\ \sigma_d^{-0,196}$	98
Solo arenoso + 8% emulsão com imersão	$MR = 91.\ \sigma_3^{0,563}\ \sigma_d^{-0,368}$	134

A Figura 4.37 apresenta os valores do MR, para os corpos-de-prova ensaiados com e sem imersão prévia em água, em função do teor de emulsão para os solo argiloso usando a emulsão convencional.

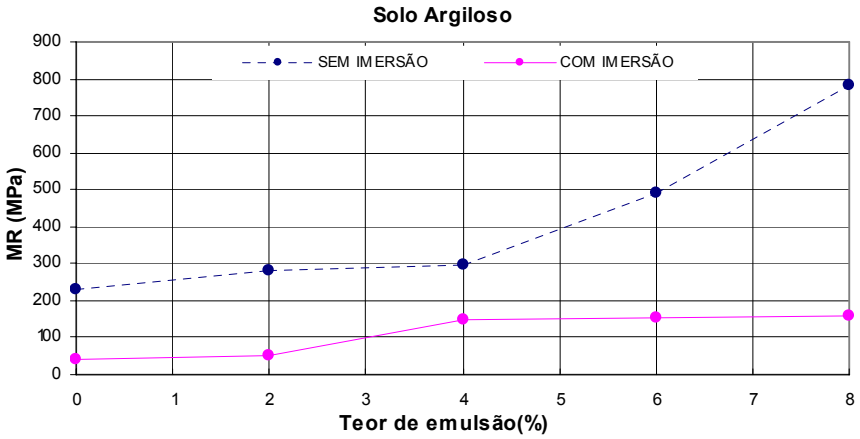


Figura 4.37 - Variação do MR do solo argiloso com o teor de emulsão convencional para 28 dias de cura sem e após imersão.

Analisando-se a Figura 4.37, observa-se que para o material argiloso ensaiado sem imersão, o módulo de resiliência aumenta 22 e 28% quando se adicionam 2 e 4% de emulsão ao solo *in natura,* para os teores de 6 e 8% este aumento é mais expressivo, sendo da ordem de 112 e 239% respectivamente para cada teor. Para a condição com imersão, o módulo de resiliência aumenta 33, 275, 287 e 305% quando se adicionam 2, 4, 6 e 8% de emulsão respectivamente, entretanto estes resultados mostram incremento do valor do MR a partir do teor de 2 e 4%, já para os teores de 4%, 6% e 8%, o crescimento varia pouco.

Observa-se que o efeito positivo da adição da emulsão ao solo argiloso destaca-se nos ensaios realizados sem imersão em água. Para estes ensaios, o MR é crescente com a adição e o aumento do teor de emulsão, para todos os teores considerados.

A Figura 4.38 apresenta os valores do MR, para os corpos-de-prova ensaiados com e sem imersão prévia em água, em função do teor de emulsão para o solo arenoso usando a emulsão convencional.

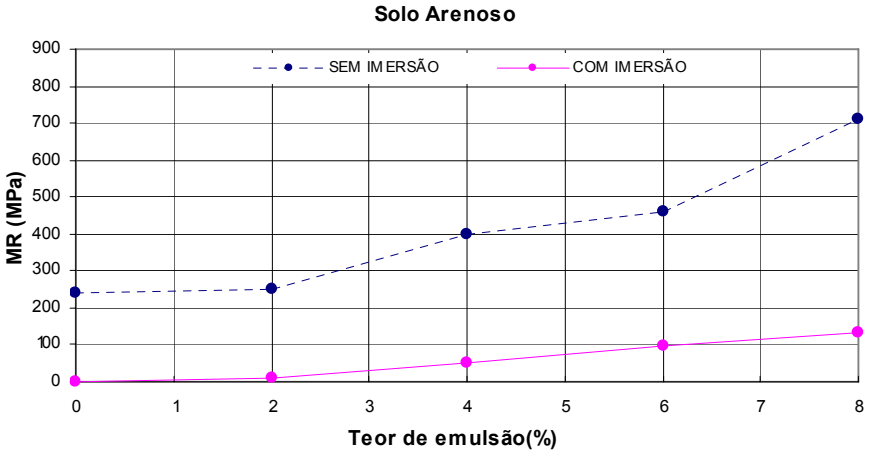


Figura 4.38 - Variação do MR do solo arenoso com o teor de emulsão convencional para 28 dias de cura sem e após imersão.

Analisando-se a Figura 4.38, observa-se para o material arenoso ensaiado sem imersão e após imersão, que o módulo de resiliência é crescente com a adição e o aumento do teor de emulsão asfáltica. Observa-se ainda que o efeito positivo da adição da emulsão ao solo arenoso tem maior destaque nos ensaios realizados sem imersão em água. Comparando-se os resultados obtidos para o solo *in natura* com os resultados correspondentes aos teores de 2, 4, 6 e 8% que conduziram a valores elevados de MR, observa-se que o valor do MR cresce respectivamente 5, 66, 93 e 197% para a condição sem imersão. Para a condição após imersão novamente não foi possível ensaiar o corpo-de-prova do solo *in natura* pela desintegração do mesmo, entretanto os resultados obtidos mostram incremento do valor do MR para todos os teores de emulsão.

Comparando-se o efeito da adição de emulsão asfáltica nos resultados dos ensaios de compressão triaxial cíclico das misturas constituídas com os solos argiloso e arenoso, observa-se que para o solo argiloso, o ganho de rigidez é maior.

Analisando os valores das Tabelas 4.11 e 4.12 e as Figuras 4.35, 4.36, 4.37 e 4,38 conclui-se que para a condição sem imersão e com imersão, as misturas compostas com o solo arenoso e emulsão dosada, apresentam na média das misturas valores de M_R 42 e 20% superiores às das misturas constituídas com o solo argiloso. Entretanto, para a emulsão convencional apresenta um padrão contrário, já que o solo argiloso para este tipo de emulsão apresenta valores 73% maiores de M_R que os observados para o solo arenoso para condição com imersão, para a condição com imersão os M_R na média são similares.

4.6.2 Ensaios complementares

4.6.2.1 Variação volumétrica

Com o objetivo de se analisar a influência da emulsão asfáltica dosada na variação de volume dos corpos-de-prova decorrente do período de cura, quando têm a sua umidade reduzida e a variação volumétrica decorrente da imersão em água, quando têm sua umidade aumentada, foram tomadas as suas medidas ao final destas duas etapas. A Figura 4.39 apresenta as

variações volumétricas médias para os diversos teores de emulsão calculadas considerando-se todos os períodos de cura.

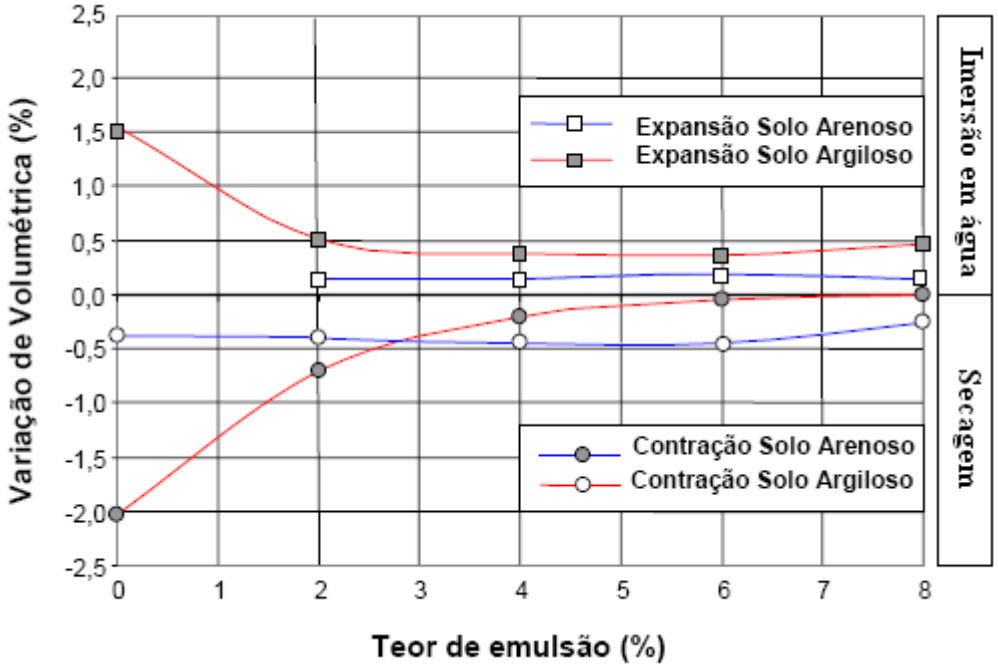


Figura 4.39 - Variação de volume dos corpos-de-prova com o teor de emulsão depois do tempo de cura e após imersão.

A partir da Figura 4.39, observa-se que durante a cura e após a imersão em água, os corpos-de-prova contraem-se e expandem-se, respectivamente para a primeira e segunda situação.

Analisando-se a contração que ocorre durante a secagem, observa-se que para o solo argiloso *in natura* este processo atua de maneira mais intensa que para o solo arenoso. A adição ou o incremento do teor de emulsão asfáltica provoca uma diminuição marcante da contração das misturas constituídas pelo solo argiloso durante a etapa de cura dos corpos-de-prova, sendo que esta praticamente anula-se a partir do teor de 6%. No tocante ao solo arenoso, a contração é pequena e se mantém constante independente do teor de emulsão.

Ainda na Figura 4.39, observa-se para a expansão um comportamento similar ao acontecido na contração, ou seja, o solo argiloso apresenta uma expansão elevada que decresce com a adição da emulsão, reduzindo-se significativamente e mantendo-se constante a partir do teor de 2%. Para o solo arenoso, a expansão é muito reduzida, mantendo-se constante independente do teor de emulsão.

4.6.2.2 Índice de suporte Califórnia

Embora este ensaio não seja o mais apropriado para a avaliação de solos estabilizados, o CBR tem sido muito utilizado na avaliação do desempenho de misturas estabilizadas. Entretanto, devido a que freqüentemente são alcançados resultados superiores a 100%, que têm pouca utilidade prática e não são significativos como medidas de resistência ou estabilidade. Neste estudo o ensaio de CBR foi realizado com um enfoque especulativo.

O ensaio de CBR foi executado na energia normal de compactação, na umidade ótima e massa específica seca máxima. As misturas de solo-emulsão não seladas foram curadas 28 dias ao ar no laboratório e por 4 dias imersos em água, esta condição de cura difere daquela adotada nos ensaios mecânicos. A Tabela 4.14 apresenta os valores de CBR e expansão para todas as misturas estudadas e também a diferença e o correspondente ganho relativo do CBR com a adição de 2, 4, 6 e 8% de emulsão dosada, calculado

com relação ao CBR obtido para os solos *in natura*. A expansão corresponde aos dias em que os corpos-de-prova encontravam-se imersos em água.

Tabela 4.14 - Valores de CBR e expansão para os solos arenoso e argiloso e, as misturas de solo-emulsão.

Tipo de Solo	Teor de Emulsão (%)	CBR (%)	Diferença	Ganho (%)	Expansão (%)
Arenoso	0	23			0,2
	2	26	3	13	0,1
	4	30	7	30	0,1
	6	33	10	44	0,1
	8	40	17	74	0,1
Argiloso	0	29			0,5
	2	35	6	21	0,3
	4	39	10	35	0,2
	6	41	12	41	0,1
	8	42	13	45	0,1

A Figura 4.40 ilustra a variação do CBR para as diversas misturas constituídas pelos solos arenoso e argiloso, respectivamente.

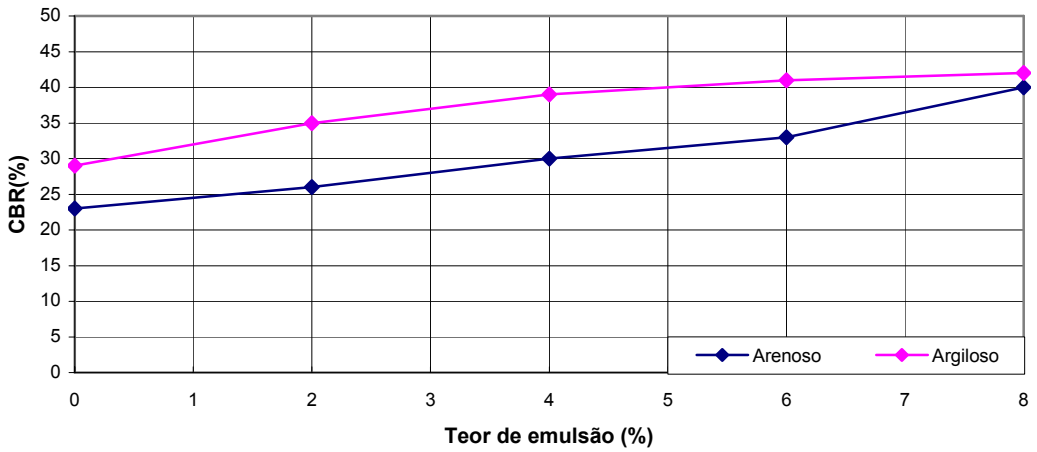


Figura 4.40 – Índice de suporte Califórnia em função do teor de emulsão para misturas de solos arenoso e argiloso.

Analisando-se os valores apresentados na Tabela 4.14 e a Figura 4.40, observa-se que ambos os solos *in natura* têm o índice de suporte Califórnia

aumentado quando é adicionada emulsão, sendo que os maiores valores de CBR acontecem para o teor de 8% de emulsão. Os solos arenoso e argiloso apresentam para 8% de emulsão, respectivamente, ganhos de CBR de 74 e 45% em relação ao CBR do solo não estabilizado.

Comparando-se os solos arenoso e argiloso, observa-se que o valor de CBR para o solo argiloso é 26% maior que o valor observado para o solo arenoso. Para as misturas com 8% de emulsão e solo argiloso, os valores de CBR são 5% maiores que os obtidos para o solo arenoso com este mesmo teor. Destaca-se assim, que o ganho de CBR é mais representativo para o solo arenoso.

Em relação à expansão, a Figura 4.41 ilustra a variação para as diversas misturas constituídas pelos solos arenoso e argiloso, respectivamente.

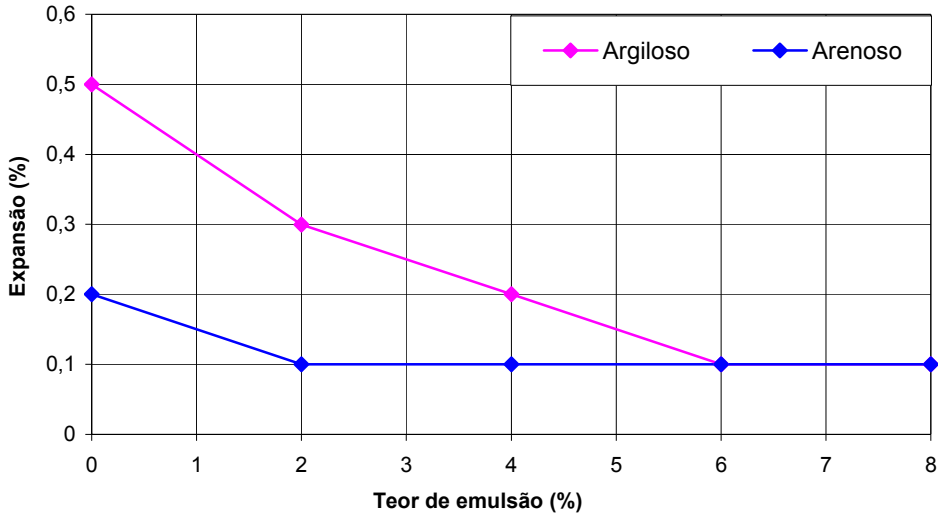


Figura 4.41 – Expansão em função do teor de emulsão para misturas de solo-emulsão para os solos arenoso e argiloso.

Analisando-se os valores apresentados na Tabela 4.14 e a Figura 4.41 observa-se que ambos os solos têm a expansão diminuída quando é adicionada emulsão. Esta redução de expansão nos solos argilosos é geralmente atribuída à menor afinidade por água das argilas misturadas com agentes hidrófobos, nesta situação a emulsão asfáltica, atua como impermeabilizante nas partículas de argila. No caso do solo arenoso, a emulsão atua como agente cimentante, contribuindo para a diminuição da expansão volumétrica.

Comparando-se a expansão das misturas com solo arenoso e argiloso, observa-se que a adição de emulsão produz uma diminuição na expansão para ambos os solos. No entanto, destaca-se que as expansões apresentadas pelas misturas com solo arenoso não são tão elevadas quanto às observadas para as misturas com solo argiloso. O solo argiloso *in natura* apresenta uma expansão igual a 0,5%, que é o valor máximo permitido na norma do DER-SP para materiais de camada base estabilizadas granulometricamente, entretanto a adição de emulsão provoca uma queda considerável de expansão, melhorando o comportamento destas misturas ante a ação da água.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O objetivo principal deste trabalho foi estudar as propriedades mecânicas de misturas constituídas com emulsão asfáltica e solo através da determinação das resistências à compressão simples, tração indireta, módulo de resiliência e índice de suporte Califórnia. Complementarmente, foi analisada a variação volumétrica dos corpos-de-prova decorrente da cura e a expansão destes quando imersos em água.

As conclusões apresentadas na seqüência estão restritas ao universo em estudo, pois os resultados podem ser dependentes dos materiais locais.

5.2 CONCLUSÕES

Constatou-se que as emulsões asfálticas de ruptura lenta apresentaram melhor desempenho no tocante à trabalhabilidade e dispersão quando misturadas aos solos estudados.

Analisando-se os parâmetros de compactação, constatou-se que a adição da emulsão asfáltica produz a diminuição da massa específica seca máxima e da umidade ótima. E este efeito é maior para as misturas constituídas com solo argiloso que para as misturas constituídas com solo arenoso.

Observou-se que a cura pré-compactação das misturas não favorece o ganho de resistência para ambos os solos. Constatou-se que a condição de cura pós-compactação mais favorável acontece quando os corpos-de-prova são selados e curados ao ar.

Os valores de resistência à compressão simples, resistência à compressão diametral e módulo de resiliência crescem com o aumento do teor de emulsão para amostras ensaiadas após imersão em água. Para a condição sem imersão, verifica-se o crescimento significativo desses valores só para a resistência à compressão diametral e módulo de resiliência.

Considerando-se os ensaios realizados após imersão em água como representativos da situação mais crítica para o pavimento, observa-se que para ambos os solos, ocorre uma ação positiva decorrente do uso da emulsão asfáltica. Nesta situação, o teor ótimo de emulsão seria de 8%.

Para o teor ótimo, tempo de cura de 28 dias e ensaios realizados após imersão, o efeito positivo da emulsão nos resultados da resistência à compressão simples é maior para o solo argiloso, sendo que para a resistência à compressão diametral, o efeito positivo é maior para o solo arenoso. No tocante, ao módulo de resiliência, o efeito é similar para ambos os solos.

O modelo composto apresentou o melhor desempenho para representar a variação do módulo de resiliência com o estado de tensão. Para a estrutura de pavimento estudada, considerando-se o centro da camada de base, os

valores do módulo de resiliência apresentaram uma tendência crescente com o aumento do teor de emulsão, para ambas as condições de ensaio, ambos os solos e as duas emulsões usadas nesta pesquisa.

Nos ensaios complementares, observa-se ganho de CBR com a adição de emulsão para ambos os solos, confirmando o efeito positivo da emulsão para condições de imersão em água. Destaca-se que as misturas com solo argiloso apresentam melhor desempenho que as misturas com solo arenoso. No tocante à expansão, observou-se o decréscimo destes valores para ambos os solos, sendo o efeito da emulsão mais importante para o solo argiloso.

No tocante à variação volumétrica, o incremento de emulsão influenciou na diminuição da expansão e contração dos corpos-de-prova moldados com misturas de solo argiloso. Entretanto, as misturas com solo arenoso não apresentaram variações significativas, já que para o solo *in natura* apresentava originalmente valores baixos de expansão e contração.

Em todas as situações, comparando-se os valores de resistência para as duas emulsões usadas, pode-se observar que as resistências obtidas para a emulsão dosada são 30% maior que as obtidas com emulsão de uso convencional. No tocante ao módulo de resiliência, os valores de rigidez observados para as duas emulsões são similares para a condição sem imersão, já com imersão a os valores com emulsão dosada são 45% maiores que para a emulsão de uso convencional.

Finalmente, conclui-se que o efeito positivo da emulsão pode contribuir para a melhoria do comportamento mecânico dos solos usados como material de construção de pavimentos. Entretanto, o uso das emulsões asfálticas aplicadas na construção rodoviária ainda exige o aprofundamento das pesquisas, principalmente no tocante às condições de cura e de ensaios que reflitam as condições de campo.

5.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ampliar a pesquisa para outros tipos de solos, estudar maiores tempos de cura que permitam avaliar o desempenho a longo prazo e comparar com outros tipos de estabilizantes .

Avaliar métodos alternativos para representar melhor as condições de cura das misturas antes e depois da compactação, controle do ganho de resistência com a perda de umidade, etc.

Determinar a influência da homogeneidade da emulsão quando misturadas ao solo e a variabilidade deste fator.

Avaliar o comportamento das misturas de solo-emulsão através da construção de trechos experimentais e seu monitoramento ao longo do tempo que permita avaliar seu desempenho.

Avaliação econômica e ambiental das vantagens e desvantagens da aplicação do solo-emulsão na construção rodoviária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AASHTO T 397-99 (1999). *Standard Method of Test for determining the resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials.* American Association of State Highway and Transportation Officials

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 6508: Grãos de solo que passam a peneira 4.8mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro.

CARVALHO, C.A.B., DOURADO FILHO, J & ESPIRITO SANTO, D. Uma análise de desgaste e de resistência à compressão simples – mistura solo-betume. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 26., 1992, Aracaju, SE., Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (1991) DER-SP ES 301 – Sub base estabilizada granulometricamente. São Paulo.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (1991) DER-SP ES 303 – Base estabilizada granulometricamente. São Paulo.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1996). CLA259-96. Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias

utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro.

FERREIRA, A. M. (1980). Estudo de três solos estabilizados com uma emulsão asfáltica catiônica. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências e Tecnologia – Universidade Federal da Paraíba – Campina Grande.

FERREIRA, J. G. H. M.; MOTTA, L. M. G. (2002). Análise comparativa de modelos de resiliência de solos e materiais não tratados quimicamente. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 16., Natal, RN, 2002. *Anais*. Natal, ANPET. v.1, p.109-20.

GARCIA-DIAZ, A.; PHILLIPS, D. T. (1995). Principles of experimental desing and analysis. Chapman & Hall. Londres.

GRUBBS, FRANK (FEBRUARY 1969), *Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples*, Technometrics, Vol. 11, No. 1, pp. 1-21.

GUIMARÃES J. E. P. (1971). Estabilização de solos, nova e importante aplicação da cal seus conceitos e suas vantagens. Associação dos produtores de cal.

HRB, Highway Research Board (1935) Highway Research Board Proceedings.

IBP, Instituto Brasileiro de Petróleo (1999) Informações básicas sobre materiais asfálticos. Comissão do asfalto.

JACINTHO, E.C. (2005), *Estudo do comportamento de misturas solo-emulsão para uso em barragens*. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade de Brasília - Brasília.

KEZDI, A. *Stabilized Earth Roads* – Developments in Geotecnical Engenering. Elseviver Company. 1979.

KENNEY, T.W., HUDSON W.R. (1968). Application of the indirect Tensile Test to stabilized materials, H.R record Nº 235.

KENNEY, T.W., HUDSON W.R. (1968). Application of the indirect Tensile Test to stabilized materials, H.R record Nº 235.

MICELI, J.G. (2006). *Comportamento de solos do estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfálticas*. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro.

PETROBRÁS (1996) - *Manual de Serviços de Pavimentação*. Petrobrás Distribuidora S.A., Rio de Janeiro, RJ

SOLIZ, V.P. (2007). *Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica.* Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Rio de Janeira. COOPE - Rio de Janeiro.

MARANGON, M. (2004). *Proposição de estruturas típicas de pavimentos para região de Minas Gerais, utilizando Solos Lateríticos locais a partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência.* Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Rio de Janeira. COOPE - Rio de Janeiro.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1981). *Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias.* In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA. Rio de Janiro, 1981.

MENDONÇA A.A., CARDOSO D.D., BUENO, B.D., FONTES M.P.F. (1997). Efeito da temperatura de cura na resistência à compressão simples de um latosolo e de um solo saprolítico estabilizados com cal. 1º Simpósio internacional de pavimentação de rodovias de baixo volume de tráfego. Rio de Janeiro Outubro.

MENDONÇA A.A., CARDOSO D.D., BUENO B.D., FONTES M.P.F. (1997). Resistência à compressão simples e a compressão diametral de misturas de solo cal: estudo dirigido a dois solos típicos de Viçosa.1º Simpósio internacional de pavimentação de rodovias de baixo volume de tráfego. Rio de Janeiro. Outubro.

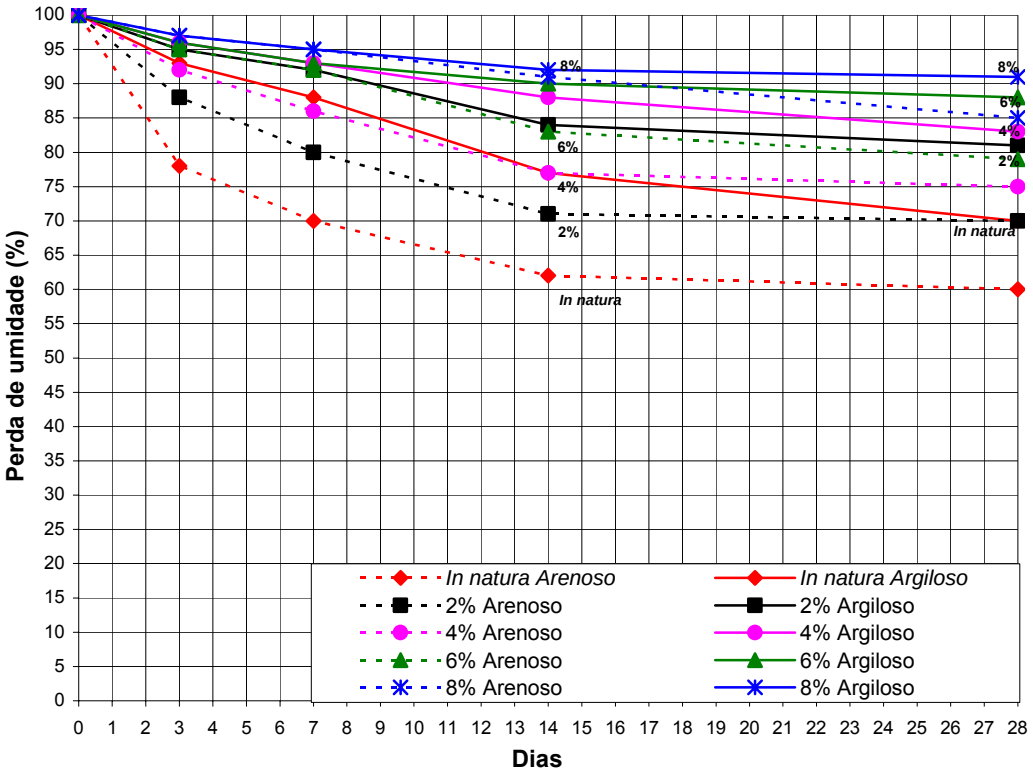
NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1995). *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo, Villibor.

ROAD TRANSPORT RESEARCH (1997). Recycling strategies for road works. Organisation for economic co-operation and development. Paris.

VILLIBOR, D.F. (1981). *Pavimentos Econômicos*, Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – São Paulo.

VIANA, H.M.F. (2007). *Estudo do comportamento resiliênte dos solos tropicais grossos do interior do Estado de São Paulo*, Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – São Carlos.

WALPOLE R.E., MYERS R.H, MYERS, S.L. (1999). Probabilidad y estadística para ingenieros, Sexta edição Prentice may Inc

- ANEXO A -

PERDA DE UMIDADE DAS MISTURAS SOLO-EMULSÃO